

Avaliação das principais variáveis que influenciam na conectividade de sedimentos com base em modelos aplicados

Warlen Librelon de Oliveira¹

E-mail: pesquisa@warlenlibrelon.com.br

 0000-0002-3815-0173

Marcelo Antonio Nero¹

E-mail: marcelo.nero@gmail.com

 0000-0003-2124-5018

Diego Rodrigues Macedo¹

E-mail: diegorm@ufmg.br

 0000-0002-1178-4969

¹Universidade Federal de Minas Gerais.
Belo Horizonte, MG, Brasil

revista

Geo 
USP
espaço e tempo

Volume 28 • n° 1 (2024)

ISSN 2179-0892

e-196088

Como citar esse artigo:

OLIVEIRA, W.L.; NERO, M.A.; MACEDO, D.R. Avaliação das principais variáveis que influenciam na conectividade de sedimentos com base em modelos aplicados. **Geosp**, v. 28, n. 1, e-196088, jan./abr. 2024. ISSN 2179-0892. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/geosp/article/view/196088>. doi: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2024.196088.pt>.



Este artigo está licenciado sob a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Avaliação das principais variáveis que influenciam na conectividade de sedimentos com base em modelos aplicados

Resumo

O índice de conectividade hidrossedimentológica determina o grau de possibilidade que os sedimentos de uma determinada área chegue a um ponto de controle. Compreender a dinâmica que ocorre com os sedimentos requer o uso de variáveis que representam a morfologia e as condições ambientais envolvidas no espaço e no tempo. Esta pesquisa propõe a análise de modelos, identificando as principais variáveis que explicam a conectividade de sedimentos e observando as influências e frequências de uso delas. Com base em 35 artigos específicos que trataram de modelos de conectividade de sedimentos, foi constatada uma representatividade importante do uso de modelos digitais de elevação em 85% dos trabalhos, com destaque para variáveis de declividade, área de drenagem, além do uso da terra. A rugosidade, apesar de extrema importância, foi usada apenas com dados tabelados, podendo assim ser um elemento a ser detalhado em novos modelos.

Palavras-chave: hidrossedimentologia; índice de conectividade; parâmetros hidrossedimentológico; métodos hidrossedimentológicos.

Evaluation of the Main Variables that Influence the Sediment Connectivity Based on Applied Models

Abstract

The hydro-sedimentological connectivity index determines the degree of possibility that sediments from a given area reach a control point. Understanding the dynamics that occur with sediments requires the use of variables that represent the morphology and environmental conditions involved in space and time. This research proposes the analysis of models, identifying the main variables that explain the connectivity of sediments and observing their influences and frequency of use. Based on 35 specific articles that deal with sediment connectivity models, an important representativeness of the use of digital elevation models was found in 85% of the works, with emphasis on slope variables, drainage area, in addition to land use. Roughness, despite being extremely important, was used only with tabulated data, thus being able to be an element to be detailed in new models.

Keywords: hydrosedimentology; connectivity index; hydrosedimentological parameters; hydrosedimentological methods.

Evaluación de las principales variables que influyen en la conectividad de sedimentos basados en modelos aplicados

Resumen

El índice de conectividad hidrosedimentológica determina el grado de posibilidad de que los sedimentos de una zona determinada lleguen a un punto de control. Comprender la dinámica que ocurre con los sedimentos requiere el uso de variables que representen la morfología y las condiciones ambientales involucradas en el espacio y el tiempo. Esta investigación propuso el análisis de modelos, identificando las principales variables que explican la conectividad de los sedimentos y observando sus influencias y frecuencia de uso. A partir de 35 artículos específicos que abordaron modelos de conectividad de sedimentos, se encontró una representatividad importante del uso de modelos digitales de elevación en el 85% de los trabajos, con énfasis en variables de pendiente, área de drenaje, además del uso del suelo. La rugosidad, a pesar de ser sumamente importante, se utilizó únicamente con datos tabulados, pudiendo así ser un elemento a detallar en nuevos modelos.

Palabras clave: hidrosedimentología; índice de conectividad; parámetros hidrosedimentológicos; métodos hidrosedimentológicos.

Introdução

A sedimentologia trata de todos os processos de produção, transporte e deposição de sedimentos a partir da sua origem até o exutório de uma bacia ou em um dado ponto de referência para a análise. Essa dinâmica pode ocorrer por meio hídrico, eólico, por arraste do movimento de animais ou ações antrópicas (Perry; Taylor, 2007; Oliveira, 2023; Mahoney; Fox, 2024). Para compreender os processos sedimentológicos (também tratados em Rodrigues, 2015), estudos recentes utilizam modelos computacionais e/ou desenvolvem índices que possam representar a dinâmica dos sedimentos ao longo da bacia hidrográfica, com alguns exemplos apresentados neste artigo. Esses modelos são construídos com o aporte de dados disponíveis a depender do objetivo e da área de estudo, os quais são aqui tratados como variáveis, também considerados como parâmetros de entrada para alguns autores.

Como parte dos estudos da sedimentologia, a conectividade vem ganhando espaço como relatado em uma revisão da literatura que abordou a dinâmica dos sedimentos (Najafi *et al.*, 2021). Ainda segundo os autores, a maioria dos estudos levantados focaram em características estáticas e não em aspectos dinâmicos da conectividade, desenvolvendo métodos e índices baseados especialmente nas estruturas, deixando a conectividade funcional, que está relacionada basicamente com os processos de transporte do sedimento à margem dos estudos. Com a evolução destes, foram surgindo conceitos para definir a conectividade de sedimentos, como: transferência de água mediada de matéria, energia e/ou organismos dentro ou entre os elementos do ciclo hidrológico (Pringle, 2001); passagem da água entre compartimentos da paisagem a partir de escoamento na bacia, causando efeitos sobre os processos biológicos e movimento de sedimentos (Bracken *et al.*, 2013); estimativa da conexão potencial entre o sedimento erodido nas encostas e o sistema de riachos (Borselli; Cassi; Torri, 2008) e transferência integrada de sedimentos por toda a bacia, de qualquer fonte possível, para determinado ponto de controle em um sistema, onde o vetor de transporte é única e exclusivamente a água, com ligações ao longo da cascata de sedimentos (Zanandrea; Kobiyama; Michel, 2017).

A conectividade de sedimentos trabalha com os componentes estrutural e funcional. A conectividade estrutural se relaciona com características físicas, como: declividade, uso e ocupação da terra, área de drenagem, rugosidade da superfície e características do sedimento; e a funcional se relaciona com os processos de erosão do solo, transporte, deposição de sedimentos, escoamento superficial e precipitação (Najafi *et al.*, 2021). Um dos primeiros modelos para calcular a conectividade de sedimentos através de um índice foi proposto por Borselli, Cassi e Torri (2008), através das características topográficas e uso da terra e com o apoio de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Através do uso do modelo LAPSUS (Research, 2018), que aplica a teoria da onda cinemática para simular erosão e deposição por fluxo superficial, foram utilizados seis modelos digitais de elevação com características diferentes para avaliar a relação das diferentes formas de relevo com a conectividade de sedimentos. Os resultados confirmaram que a relação não é linear e que os eventos de chuvas podem ter importâncias diferentes em função da complexidade da paisagem (Baartman *et al.*, 2013).

A produção de sedimentos, a conectividade dos sedimentos e a taxa de entrega de sedimentos estão fortemente relacionados, porém existem diferenças importantes entre elas. A produção de sedimentos quantifica a massa no espaço e no tempo através de modelos matemáticos com o uso de equações consolidadas na literatura (Carvalho, 2008). A taxa de entrega de sedimentos determina a fração de todo sedimento erodido na bacia hidrográfica que chega ao exutório (Minella; Merten; Clarke, 2009). A conectividade de sedimentos só depende da morfologia para sua determinação. No entanto, outras variáveis podem ser utilizadas como parte dos processos para cálculo da conectividade. (Zanandrea *et al.*, 2020).

Através de vários artigos revisados dentro do tema de conectividade de sedimentos, Najafi *et al.* (2021) organizaram os trabalhos em cinco categorias diferentes: (1) desenvolvimento de estruturas conceituais; (2) representação a distribuição espacial e temporal das áreas de origem e sumidouro de sedimentos; (3) desenvolvimento de índices de conectividade de sedimentos; (4)

uso e desenvolvimento de modelos; ou (5) investigação da probabilidade de entrega de sedimentos por meio de uma abordagem de análise de rede.

Estudos têm sido desenvolvidos utilizando dados geomorfológicos e morfométricos, como: o comprimento do percurso de transporte dos sedimentos, a declividade do terreno, a área de drenagem e a rugosidade da superfície, sendo estes derivados de modelo digital de terreno (MDT). Esse alto número de pesquisas que usam esses dados de MDTs podem ser explicados pela evolução dos *softwares* de Sistema de Informação Geográfica (SIG), os quais facilitam e agilizam os processos no uso desses dados. Essas aplicações podem ser observadas em artigos mais antigos, como, por exemplo, Fryirs *et al.* (2007) e Borselli, Cassi e Torri (2008).

Entre uma diversidade de variáveis aplicadas nos modelos, existem algumas com maior frequência e outras que são características específicas dos sedimentos, as quais foram alvos de análises e observações neste trabalho. A partir da busca de trabalhos que aplicaram modelos relacionados à conectividade de sedimentos, a proposta deste artigo é uma revisão bibliográfica para análise e discussão das principais variáveis aplicadas a partir de um agrupamento considerando variáveis hidrológicas, geomorfológicas e sedimentológicas, e, com essa organização e análise, poder identificar possíveis lacunas para novas pesquisas.

Materiais e métodos

Este trabalho constitui uma revisão da literatura científica de caráter analítico a respeito dos modelos aplicados para análise de conectividade de sedimentos. A busca e seleção das informações de referência para este estudo se deu utilizando a base de dados da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), Google Scholar e Science Direct. Como critério de busca, foi aplicada a restrição aos artigos publicados a partir do ano de 2000 a 2023. Entre os artigos encontrados sobre sedimentologia, foram identificados aqueles que utilizaram modelos de conectividade de sedimentos para analisar os parâmetros aplicados na metodologia, os quais serviram de base para a discussão do presente trabalho. Após a identificação dos artigos, foram selecionadas as principais variáveis usadas nos modelos para uma observação da frequência de aplicação entre os trabalhos.

No primeiro momento, as variáveis de interesse a serem observadas foram agrupadas em: hidrológica (precipitação, erosividade, precipitação antecedente, taxa de infiltração, escoamento superficial), geomorfológica (comprimento do percurso, declividade, área de drenagem, fator topográfico, rugosidade do terreno), sedimentológica (densidade do sedimento, erodibilidade do solo, granulometria do sedimento, coesão do sedimento, sólidos em suspensão e perda de solo) e uso da terra. Foi criada uma planilha para organizar e identificar as variáveis aplicadas nos artigos e, assim, poder calcular as devidas proporções.

Entende-se como variáveis a identificação dos dados usados como entrada nos modelos para atender os objetivos de cada trabalho. Vale ressaltar que existem outras variáveis aplicadas nos modelos e não relatadas anteriormente por não serem comuns a todos os artigos analisados. Com os artigos selecionados, foi identificado e tabelado o modelo usado, uma definição objetiva do trabalho, resolução do MDE (modelo digital de elevação) aplicado no modelo, as variáveis utilizadas e o grupo que as variáveis pertencem.

Através da busca foram identificados 831 artigos contendo a palavra “sedimentos” na CAPES e 835 na base Science Direct, todos nos últimos 24 anos. Quando se restringiu a busca para “modelos sedimentológicos”, o número de artigos foi reduzido consideravelmente, obtendo-se 70 artigos na CAPES, 371 no Google Scholar e 645 no caso do Science Direct. Finalmente, com mais uma palavra-chave, “hidrossedimentologia”, a busca encontrou 40 artigos na CAPES, 1.650 no Google Scholar e nenhum no Science Direct. De toda a busca, foram identificados 35 artigos que contemplavam a aplicação de modelos de conectividade sedimentológica para análise e discussão dos parâmetros aplicados nos modelos de conectividade.

Resultados e discussões

Durante as análises foram observados trabalhos que aplicavam mais de um modelo no processo, bem como algumas adaptações (ver Tabela 1).

O primeiro trabalho de sedimentologia registrado no Brasil foi efetuado pela CEEE (Companhia Estadual de Energia Elétrica) no rio Camaquã, no Rio Grande do Sul, com o objetivo de prever o assoreamento e cálculo da vida útil do reservatório da barragem do Paredão (Carvalho, 2008). Porém, quando se adentra na especificidade com o processo de conectividade dos sedimentos, as pesquisas são mais recentes (Zanandrea, 2017). A evolução cronológica da produção científica relacionada com a conectividade de sedimentos foi relatada através de 142 trabalhos, como demonstrado na Figura 1, destacando-se como ápice o ano de 2017 (Najafi *et al.*, 2021).

Entre os artigos avaliados, 43% aplicaram a base do modelo proposto por Borselli, Cassi e Torri (2008) ou adaptado por Cavalli *et al.* (2013), e 69% citaram Borselli, Cassi e Torri (2008). Dessa forma, fica nítida a importância da proposta inicializada por Borselli e que foi evoluindo com o tempo, trazendo novos índices com o objetivo de melhorar e trazer novos elementos para a modelagem de conectividade de sedimentos.

Pelos grupos apresentados na Tabela 2, 31% dos artigos utilizaram dados hidrológicos, 46% para dados geomorfológicos, 12% para dados sedimentológicos e 11% do total para uso da terra. Isso reforça a importância dos dados geomorfológicos. Pelo menos uma variável de cada classe foi utilizada por 28% dos artigos, demonstrando, assim, uma diversidade no uso das variáveis.

Mesmo com uma grande aplicação da variável área de drenagem (Tabela 2), não quer dizer que o valor da área tenha sido utilizado nas análises como possível influência na dinâmica dos sedimentos. Apesar de não ser considerado como uma variável nas análises, o MDE é uma informação de extrema importância, a qual apenas um artigo não utilizou como dado de entrada para o modelo. Porém, é importante ressaltar que algumas variáveis são derivadas do MDE, como: declividade, comprimento da rampa e área de drenagem, o que justifica a ampla utilização desta variável.

Tabela 1 – Relação dos modelos de avaliação da conectividade de sedimentos

Autores	Modelo	Definição	Borselli como referência*	Resolução	Variáveis aplicadas	Grupo
(Asadi; Dastorani; Sidle, 2023)	Aplicação com Redes Neurais Artificiais	Aplicação com Redes Neurais Artificiais com o uso do IC (Borselli) para comparação	Aplicado	MDE 30m	Precipitação, Erosividade, Precipitação Antecedente, Escoamento superficial, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Fator Topográfico, Rugosidade do Terreno, Uso e Cobertura da Terra, Erodibilidade do solo, Elevação Média, Gradiente Médio de Declive e Umidade Superficial do Solo.	Geomorfológica, hidrológica, sedimentológica e uso e cobertura da terra
(Liu <i>et al.</i> , 2022)	Adaptado IC (Borselli) com inclusão de cálculo de erosividade, erodibilidade e características de uso da terra	Índice revisado de conectividade de sedimentos (RIC) incorporando o funcional com os componentes estruturais de um sistema de roteamento de sedimentos	Aplicado	MDE 30m	Precipitação, Erosividade, Precipitação Antecedente, Escoamento superficial, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Fator Topográfico, Rugosidade do Terreno, Uso e Cobertura da Terra, Erodibilidade do solo.	Geomorfológica, hidrológica, sedimentológica e uso e cobertura da terra
(Zingaro <i>et al.</i> , 2019)	Índice de conectividade de fluxo de sedimentos (SCI)	Representa um gradiente de mobilidade dos sedimentos integrando aspectos funcionais dentro do componente estrutural	Citado	MDE 2 m	Uso e Cobertura da Terra, Solo, Precipitação, Declividade, Rugosidade	Geomorfológica, hidrológica e uso e cobertura da terra
(López-Vicente; Ben-Salem, 2019)	Índice agregado de conectividade de vazão e sedimentos (AIC)	Representa a potencial conectividade de vazão e sedimentos considerando a variação temporal e espacial	Aplicado	MDE 5 m	Precipitação, Erosividade, Precipitação Antecedente, Escoamento superficial, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Fator Topográfico, Rugosidade do Terreno, Uso e Cobertura da Terra, Erodibilidade do solo, Perda de Solo	Geomorfológica, hidrológica, sedimentológica e uso e cobertura da terra
(Turnbull; Wainwright, 2019)	Indicador de conectividade	Quantifica a taxa entre conectividade funcional e estrutural com modelos de escoamento superficial e de transporte de sedimentos	Citado	Não Informado	Precipitação, Erosividade, Escoamento superficial, Declividade, Área de Drenagem, Rugosidade do Terreno, Uso e Cobertura da Terra, Perda de Solo	Geomorfológica e hidrológica
(Fressard; Cossart, 2019)	Indicador de conectividade	Avalia a conectividade sedimentológica estrutural pelo índice de fluxo residual		MDE 20 m	Precipitação, Escoamento superficial, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Uso e Cobertura da Terra	Geomorfológica

Tabela 1 – Cont.

Autores	Modelo	Definição	Borselli como referência*	Resolução	Variáveis aplicadas	Grupo
(Mishra <i>et al.</i> , 2019)	Índice de conectividade de sedimento (IC) e modelo SWAT (<i>Soil and Water Assessment Tool – Software de avaliação de solo e água</i>)	Avaliou a conectividade de sedimentos com combinação de modelos, comparando com dados observados e destacando a variabilidade espacial com a dinâmica estrutural dos sedimentos	Aplicado	MDE 90 m	Precipitação, Taxa de Infiltração, Escoamento superficial, Declividade, Área de Drenagem, Uso e Cobertura da Terra, Sólidos em Suspensão, Perda de Solo	Geomorfológica, uso e cobertura da terra, hidrológica e sedimentológica
(Di Stefano; Ferro, 2019)	Modelo <i>Sediment Delivery Distributed</i> (SEDD)	Uso de variáveis morfométricas para avaliar a conectividade de sedimentos	Citado	MDE 2 m	Precipitação, Escoamento superficial, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem	Geomorfológica
(Cislaghi; Bischetti, 2019)	Método: PRIMULA PRobabilistic MULTidimensional Landslide Analysis	Determinou a probabilidade de conectividade de sedimentos em encostas até o corpo hídrico	Citado	MDE 5 m	Precipitação, Escoamento superficial, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Uso e Cobertura da Terra, Coesão do sedimento	Geomorfológica, hidrológica, uso e cobertura da terra e sedimentológica
(Llena <i>et al.</i> , 2019)	Índice de Conectividade de sedimento (IC) e algoritmo SfM-MVS	Compreender a evolução da conectividade de sedimentos associada a diferentes usos da terra e mudanças topográficas	Aplicado	MDE 5 m	Precipitação, Escoamento Superficial, Uso e Cobertura da Terra, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem	Geomorfológica e uso e cobertura da terra
(Mahoney; Fox; Al Aamery, 2018)	Probabilidade da conectividade de sedimentos	Modelo de conectividade de sedimentos que se baseia nas probabilidades de intersecção da fonte, destacamento e transporte de sedimentos integrado em uma estrutura de modelagem hidrossedimentológica de bacias hidrográficas.	Citado	MDE 9 m	Precipitação, Escoamento superficial, Declividade, Área de Drenagem, Uso e Cobertura da Terra, Sólidos em Suspensão	Geomorfológica, hidrológica e sedimentológica

Tabela 1 – Cont.

Autores	Modelo	Definição	Borselli como referência*	Resolução	Variáveis aplicadas	Grupo
(Grauso; Pasanisi; Tebano, 2018)	Índice de Conectividade Simplificado (SCI)	Expressa a capacidade potencial da transferência de sedimentos disponível em uma seção do rio.	Citado	MDE 20 m	Escoamento superficial, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Perda de Solo	Geomorfológica e sedimentológica
(Persichillo <i>et al.</i> , 2018)	Índice de conectividade de sedimento (IC)	Analisou os efeitos antrópicos nas modificações da paisagem a partir da influência resultante da entrega de sedimentos	Aplicado	MDE 5 m	Precipitação, Escoamento superficial, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Rugosidade do Terreno, Uso e Cobertura da Terra	Geomorfológica, hidrológica, uso e cobertura da terra e sedimentológica
(Rathburn; Shahverdian; Ryan, 2018)	Índice de resiliência	Avaliar a recuperação de sedimentos pós-perturbação através da resiliência		Não Aplicado	Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Densidade do sedimento, Coesão do sedimento, Perda de Solo	Sedimentológica
(Zanandrea; Kobiyama; Michel, 2017)	Índice de conectividade hidrossedimentológica (IChS)	Calcula o grau de conectividade de um escoamento com o canal	Aplicado	Não Informado	Precipitação, Precipitação Antecedente, Escoamento superficial, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Rugosidade do Terreno, Uso e Cobertura da Terra	Geomorfológica e sedimentológica
(Coulthard; van de Wiel, 2017)	Modelo de evolução da paisagem	Utilização de modelo de evolução da paisagem para avaliar conectividade de sedimentos		MDE 50 m	Precipitação, Escoamento superficial, Declividade, Área de Drenagem, Sólidos em Suspensão	CAESAR e CAESAR -Lisflood
(Calsamiglia <i>et al.</i> , 2017)	Índice de conectividade de sedimento (IC)	Analisou a qualidade do solo usando padrões espaciais de conectividade hidrológica e sedimentar	Aplicado	MDE 1 m	Precipitação, Escoamento superficial, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Rugosidade do Terreno, Uso e Cobertura da Terra	Geomorfológica, hidrológica, uso e cobertura da terra e sedimentológica
(De Walque <i>et al.</i> , 2017)	Regressão logística com índice de conectividade de sedimento (IC)	Avaliou o risco de inundação lamacenta com regressão logística e IC como uma das variáveis explicativas	Aplicado	MDE 10 m	Precipitação, Escoamento superficial, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Rugosidade do Terreno, Uso e Cobertura da Terra, Sólidos em Suspensão, Perda de Solo	Geomorfológica, hidrológica, uso e cobertura da terra e sedimentológica

Tabela 1 – Cont.

Autores	Modelo	Definição	Borselli como referência*	Resolução	Variáveis aplicadas	Grupo
(Kalantari <i>et al.</i> , 2017)	Índice de conectividade de sedimento (IC)	Avaliou a probabilidade de inundação em infraestrutura de transporte a partir do acúmulo de sedimentos	Aplicado	MDE 2 m	Precipitação, Precipitação Antecedente, Escoamento superficial, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Rugosidade do Terreno, Uso e Cobertura da Terra	Geomorfológica, hidrológica, uso e cobertura da terra e sedimentológica
(Masselink <i>et al.</i> , 2017)	Classificador Random Forest e traçador de óxido de terra	Avaliou a conectividade de sedimentos com método de aprendizagem de máquina Random Forest		MDE 0,1 m	Precipitação, Granulometria do sedimento, Perda de Solo	Geomorfológica, hidrológica, uso e cobertura da terra e sedimentológica
(Bywater-Reyes; Segura; Bladon, 2017)	Regressão de mínimos quadrados e análise de componentes principais	Relevância nos controles naturais na produção de sedimentos.		MDE 0,9 m	Precipitação, Escoamento superficial, Declividade, Área de Drenagem, Perda de Solo	Geomorfológica, uso e cobertura da terra e sedimentológica
(Ortíz-Rodríguez; Borselli; Sarocchi, 2017)	Índice conjunto de conectividade (ICJ) e índice de eficiência hidrológica lateral (LHEI)	Análise de mobilização de sedimentos piroclásticos. Identificação de bacias hidrográficas que fornecem grandes quantidades de sedimentos com novo índice.	Aplicado	MDE 5 m	Precipitação, Erosividade, Taxa de Infiltração, Escoamento superficial, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Rugosidade do Terreno, Uso e Cobertura da Terra, Sólidos em Suspensão, Perda de Solo	Geomorfológica, hidrológica, uso e cobertura da terra e sedimentológica
(Lisenby; Fryirs, 2017)	Análise de sedimentos através de coleta em campo	Foi avaliada a distribuição dos principais tipos de amortecedores de sedimentos (planícies aluviais, terraços, etc.), barreiras (açudes) e área de captação efetiva para caracterizar o potencial de (des)conectividade de sedimentos grosseiros		MDE 1 m	Precipitação, Escoamento superficial, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Rugosidade do Terreno, Uso e Cobertura da Terra	Geomorfológica, uso e cobertura da terra e sedimentológica

Tabela 1 – Cont.

Autores	Modelo	Definição	Borselli como referência*	Resolução	Variáveis aplicadas	Grupo
(Gran; Czuba, 2015)	Modelo de Czuba e Foufoula-Georgiou	Avaliou o comportamento de pulsos de sedimentos, observando o papel da estrutura de rede		MDE 3 m	Precipitação, Erosividade, Escoamento superficial, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Rugosidade do Terreno, Uso e Cobertura da Terra, Erodibilidade do solo, Perda de Solo	Geomorfológica, hidrológica e sedimentológica
(Liu; Fu, 2016)	Indicadores de conectividade	Quantifica a conectividade hidrossedimentológica de uma bacia utilizando modelo de erosão do solo e sedimentação	Citado	MDE 10 m	Precipitação, Escoamento superficial, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Rugosidade do Terreno, Uso e Cobertura da Terra	Geomorfológica e hidrológica
(Pechenick <i>et al.</i> , 2014)	Estatística multi-escala	Avalia a conectividade de sedimentos entre estradas rurais e canais na bacia		Não Informado	Precipitação, Precipitação Antecedente, Declividade, Uso e Cobertura da Terra, Perda de Solo	Geomorfológica e sedimentológica
(Messenzehl; Hoffmann; Dikau, 2014)	Índice de conectividade de sedimentos e índice morfométrico	Índice morfométrico através de geoprocessamento, para caracterizar a conectividade de sedimentos ao canal	Aplicado	MDE 2 m	Precipitação, Escoamento superficial, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Rugosidade do Terreno, Uso e Cobertura da Terra	Geomorfológica e uso e cobertura da terra
(Cavalli <i>et al.</i> , 2013)	Índice de conectividade de sedimentos (IC)	Abordagem geomorfológica da conectividade de sedimento em relação aos fluxos de detritos	Aplicado	MDE 2,5 m	Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Rugosidade do Terreno, Uso e Cobertura da Terra, Perda de Solo	Geomorfológica
(Baartman <i>et al.</i> , 2013)	Índices de complexidade morfológica e de conectividade de sedimentos	Avalia relações entre a complexidade da paisagem e a conectividade da bacia		MDE 30 m	Precipitação, Erosividade, Taxa de Infiltração, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Rugosidade do Terreno, Uso e Cobertura da Terra	Geomorfológica e hidrológica
(Croke; Fryirs; Thompson, 2013)	Conectividade sistema canal/ planície aluvial	Avalia a conectividade de água e sedimentos do sistema canal/ planície aluvial	Citado	MDE 1 m	Precipitação, Escoamento superficial, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Rugosidade do Terreno, Uso e Cobertura da Terra, Perda de Solo	Geomorfológica e hidrológica

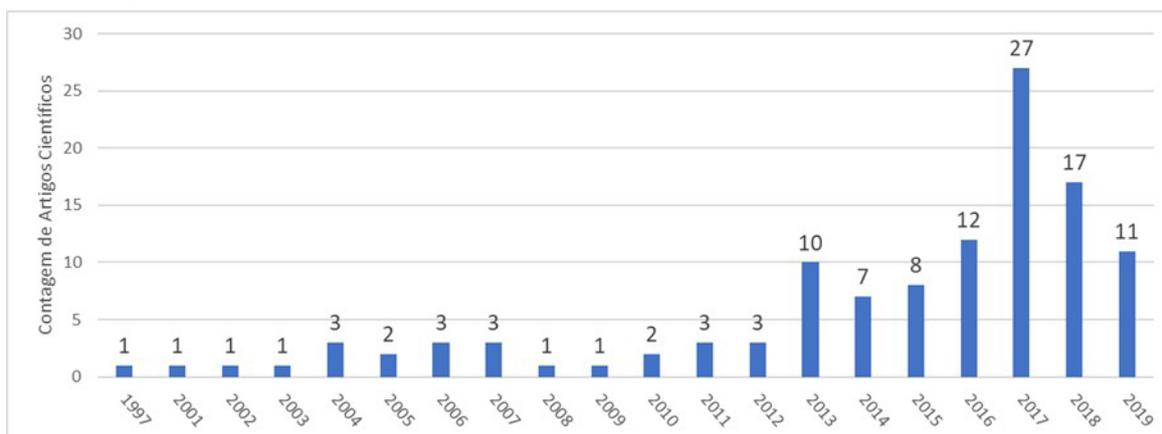
Tabela 1 – Cont.

Autores	Modelo	Definição	Borselli como referência*	Resolução	Variáveis aplicadas	Grupo
(Tobias; Wolfgang, 2013)	Gráfico espacial	Avalia a conectividade das fontes e acumulações de sedimentos.	Citado	MDE 1 m	Precipitação, Escoamento superficial, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Rugosidade do Terreno, Uso e Cobertura da Terra	Geomorfológica
(Duvert <i>et al.</i> , 2011)	Monitoramento hidrossedimentológico	Avaliou a conectividade entre as taxas de transferência de sedimentos e a vazão de base		MDE 10 m	Precipitação, Escoamento superficial, Declividade, Área de Drenagem, Uso e Cobertura da Terra, Sólidos em Suspensão, Perda de Solo	Geomorfológica, hidrológica e sedimentológica
(Borselli; Cassi; Torri, 2008)	Índice de conectividade de campo (FIC)	Dependem das intensidades dos eventos que ocorreram localmente e que deixaram sinais visíveis	Aplicado	MDE 5 m	Precipitação, Escoamento superficial, Erosividade, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem	Geomorfológica e uso e cobertura da terra
(Borselli; Cassi; Torri, 2008)	Índice de conectividade de sedimento (IC)	Identificou a representação da potencial conectividade baseada nas características da paisagem	Aplicado	MDE 5 m	Precipitação, Escoamento superficial, Erosividade, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem	Geomorfológica e uso e cobertura da terra
(Fryirs <i>et al.</i> , 2007)	Modelo conceitual	Avaliou a conectividade da cadeia de sedimentos na bacia hidrográfica		Não Informado	Precipitação, Comprimento do Percurso, Declividade, Área de Drenagem, Densidade do sedimento, Granulometria do sedimento, Perda de Solo	

Fonte: Elaborada pelos autores.

*A coluna “Borselli como referência”, quando em branco, significa que o modelo não foi aplicado e nem citado pelos autores.

Figura 1 – Evolução da produção científica para conectividade de sedimentos.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 2 – Proporção das aplicações das variáveis nos trabalhos avaliados

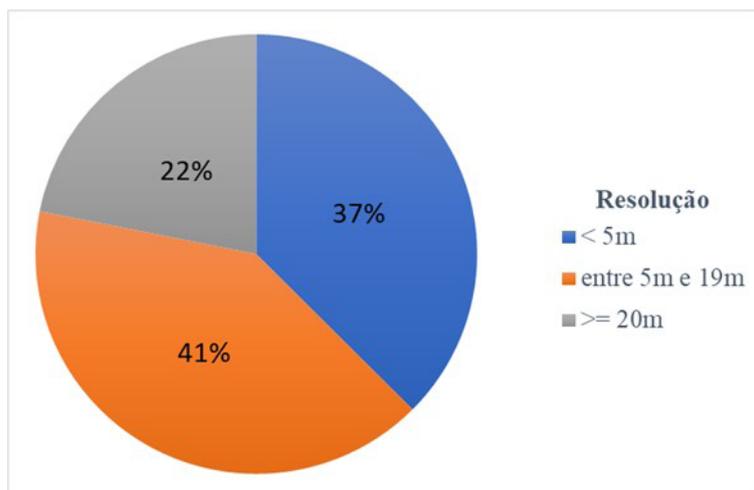
Grupo	Variável	Proporção das aplicações
Hidrológica	Uso e Cobertura da Terra	77%
	Precipitação	91%
	Erosividade	20%
	Precipitação Antecedente	11%
	Escoamento superficial	80%
	Comprimento da rampa	74%
Geomorfológica	Declividade	97%
	Área de Drenagem	91%
	Rugosidade do Terreno	51%
	Densidade do sedimento	6%
	Erodibilidade	6%
Sedimentológica	Granulometria do sedimento	6%
	Coesão do sedimento	6%
	Sólidos em Suspensão	17%
	Perda de Solo	40%

Fonte – Elaborada pelos autores.

Devido à grande utilização de MDE nas aplicações, foram observadas as resoluções das imagens empregadas nas modelagens. Foi constatado o uso de imagens com resolução espacial acima de 5m na maioria dos artigos como mostra a Figura 2.

Entre os artigos que usaram a rugosidade da superfície, 60% aplicaram valores tabelados, seja através do coeficiente de Manning, do fator C ou da variação da declividade. O restante (40%) utilizou cálculos com base na topografia residual com imagem de satélite. Entre os trabalhos que aplicaram uma tabela de valores para a rugosidade, 73% usaram o coeficiente de Manning. Apenas 10% dos trabalhos aplicaram a rugosidade com base no uso da terra com dados tabelados.

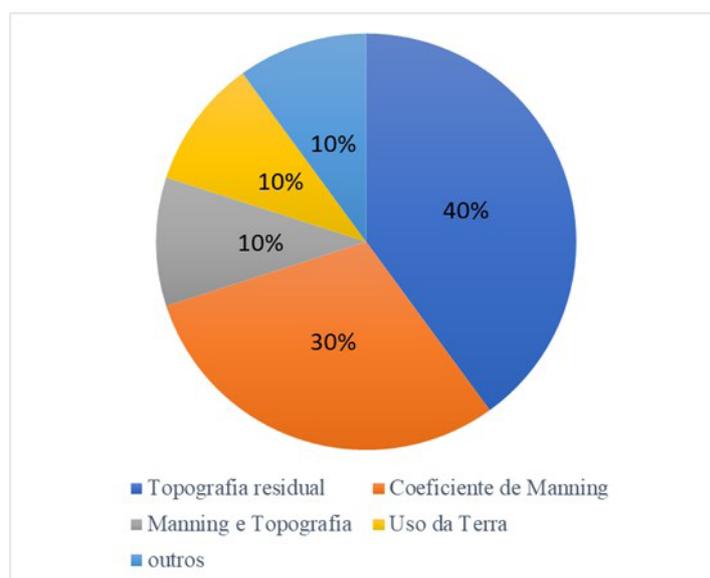
Figura 2 – Faixa de resoluções de imagens aplicadas nos artigos.



Fonte: Elaborada pelos autores (2023).

Com uma alta proporção de aplicação da rugosidade (91%), essa variável chama a atenção não apenas por esse valor, mas por ter formas diferentes de uso (tabelado ou calculado). Apesar do coeficiente de Manning ser um dado bem consolidado nos artigos, vale uma observação, de que valores tabelados podem não refletir a realidade das áreas, o que pode sugerir estudos para comparar o uso da rugosidade em suas duas formas de aplicação (tabelado ou calculado). Foi identificado apenas um artigo que aplicou a integração com dados de uso da terra, declividade e tipo de solo, através do modelo *SWAT model*, porém usado com dados secundários (Mishra *et al.*, 2019). Ainda nesse trabalho, os autores analisaram a influência da variação da declividade apenas relacionadas aos cursos d'água, e não a bacia. Com base nos artigos avaliados, a Figura 3 apresenta a distribuição dos métodos aplicados para uso da rugosidade.

Figura 3 – Métodos aplicados para a rugosidade.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Conclusões

Diante das observações nas referências analisadas, os autores convergem para um consenso de que a conectividade sedimentológica é um termo complexo no qual a diversidade, as correlações entre parâmetros e a dinâmica dos sedimentos em uma região podem ser os principais obstáculos no desenvolvimento de modelos de conectividade sedimentológica. Sendo assim, existe um alinhamento com esse pensamento que as evidências nos processos da conectividade sedimentológica estão limitadas e que ainda existem diversas lacunas para pesquisas, como, por exemplo, o uso de mais parâmetros de elementos funcionais ou melhorar a representação da rugosidade superficial. Além desses pontos limitantes, as pesquisas situam-se mais no componente estrutural do que no componente funcional, sendo assim, abrem-se oportunidades para novas pesquisas aplicarem o uso de variáveis desse componente.

Apesar do grande potencial da aplicação com o uso da declividade e que tem uma importância significativa nos processos de conectividade, não foi observado uma análise mais criteriosa com relação à variação dos declives na influência da conectividade.

O uso de dados geomorfológicos, especialmente com base nos modelos digitais de elevação, está bem consolidado nas pesquisas, nas quais se destaca a qualidade dos resultados em função das resoluções espaciais das imagens. Assim, esses dados podem ser mais bem utilizados e potencializados com o emprego de imagens de drones e com processos fotogramétricos mais acurados, em que o tamanho do pixel é menor, atingindo, na prática, até 0,05 m. No entanto, ressalta-se avaliar as limitações atuais em termos de capacidade computacional e de viabilidade em termos de tempo de processamento.

Quando observados os parâmetros sedimentológicos, apenas 12% dos artigos estudados aplicaram esses parâmetros. Vale destacar que os parâmetros correspondentes à densidade e coesão foram pouco utilizados nos modelos, o que não elimina a importância destes. Assim, a busca de novas modelagens com foco em parâmetros sedimentológicos abrirá caminhos para novas observações e a melhor compreensão da dinâmica dos sedimentos.

Com uma quantidade significativa de parâmetros aplicados nos modelos, nenhum dos trabalhos discutiu a importância relativa de cada um nos devidos modelos. Informação importante que pode direcionar novas pesquisas para compreender melhor os processos das variáveis mais sensíveis.

Referências

- ASADI, H.; DASTORANI, M. T.; SIDLE, R. C. Estimating index of sediment connectivity using a smart data-driven model. **Journal of Hydrology**, v. 620, Parte A, p. 129467, 2023.
- BAARTMAN, J. E. M. *et al.* Linking landscape morphological complexity and sediment connectivity. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, n. 12, p. 1457-1471, 2013.
- 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, 2008.

- BRACKEN, L. J. *et al.* Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, Pathways and future agendas. **Earth-Science Reviews**, v. 119, p. 17-34, 2013.
- BYWATER-REYES, S.; SEGURA, C.; BLADON, K. D. Geology and geomorphology control suspended sediment yield and modulate increases following timber harvest in temperate headwater streams. **Journal of Hydrology**, v. 548, p. 74-83, 2017.
- CALSAMIGLIA, A. *et al.* Changes in soil quality and hydrological connectivity caused by the abandonment of terraces in a Mediterranean burned catchment. **Forests**, v. 8, n. 9, p. 1-20, 2017.
- CARVALHO, N. de O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2008.
- CAVALLI, M. *et al.* Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. **Geomorphology**, v. 188, p. 31-41, 2013.
- CISLAGHI, A.; BISCHETTI, G. B. Source areas, connectivity, and delivery rate of sediments in mountainous-forested hillslopes: A probabilistic approach. **Science of the Total Environment**, v. 652, p. 1168-1186, 2019.
- COULTHARD, T. J.; VAN DE WIEL, M. J. Modelling long term basin scale sediment connectivity, driven by spatial land use changes. **Geomorphology**, v. 277, p. 265-281, 2017.
- CROKE, J.; FRYIRS, K.; THOMPSON, C. Channel-floodplain connectivity during an extreme flood event: Implications for sediment erosion, deposition, and delivery. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, n. 12, p. 1444-1456, 2013.
- DE WALQUE, B. *et al.* Artificial surfaces characteristics and sediment connectivity explain muddy flood hazard in Wallonia. **Catena**, v. 158, p. 89-101, Nov. 2017.
- DI STEFANO, C.; FERRO, V. Assessing sediment connectivity in dendritic and parallel calanchi systems. **Catena**, v. 172, p. 647-654, Jan. 2019.
- DUVERT, C. *et al.* Baseflow control on sediment flux connectivity: Insights from a nested catchment study in Central Mexico. **Elsevier**, v. 87, p. 129-140, 2011.
- FRESSARD, M.; COSSART, E. A graph theory tool for assessing structural sediment connectivity: Development and application in the Mercurey vineyards (France). **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 2566-2584, 2019.
- FRYIRS, K. A. *et al.* Buffers, barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades. **Catena**, v. 70, n. 1, p. 49-67, 2007.
- GRAN, K. B.; CZUBA, J. A. Sediment pulse evolution and the role of network structure. **Geomorphology**, v. 277, p. 17-30, 2015.
- GRAUSO, S.; PASANISI, F.; TEBANO, C. Assessment of a simplified connectivity index and specific sediment potential in river basins by means of geomorphometric tools. **Geosciences (Switzerland)**, v. 8, n. 2, 2018.

- KALANTARI, Z. *et al.* Flood probability quantification for road infrastructure: Data-driven spatial-statistical approach and case study applications. **Science of the Total Environment**, v. 581-582, p. 386-398, 2017.
- LISENBY, P.E.; FRYIRS, K. A. Sedimentologically significant tributaries: catchment-scale controls on sediment (dis)connectivity in the Lockyer Valley, SEQ, Australia. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 42, n. 10, p. 1493-1504, 2017.
- LIU, W. *et al.* Evaluating sediment connectivity and its effects on sediment reduction in a catchment on the Loess Plateau, China. **Geoderma**, v. 408, p. 115566, 2022.
- LIU, Y.; FU, B. Assessing sedimentological connectivity using WATEM/SEDEM model in a hilly and gully watershed of the Loess Plateau, China. **Ecological Indicators**, v. 66, p. 259-268, 2016.
- LLENA, M. *et al.* The effects of land use and topographic changes on sediment connectivity in mountain catchments. **Science of the Total Environment**, v. 660, p. 899-912, 2019.
- LÓPEZ-VICENTE, M.; BEN-SALEM, N. Computing structural and functional flow and sediment connectivity with a new aggregated index: A case study in a large Mediterranean catchment. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 179-191, 2019.
- MAHONEY, D. T.; FOX, J. F.; AL AAMERY, N. Watershed erosion modeling using the probability of sediment connectivity in a gently rolling system. **Journal of Hydrology**, v. 561, p. 862-883, 2018.
- MAHONEY, D. T.; FOX, J. F. Quantification of bedrock structural controls of longitudinal sediment connectivity using the probability of connectivity and sediment continuity model. **Geomorphology**, v. 448, p. 109027, 2024.
- MASSELINK, R. *et al.* Assessing hillslope-channel connectivity in an agricultural catchment using rare-earth oxide tracers and random forests models. **Cuadernos de Investigación Geográfica**, v. 43, n. 1, p. 17, 2017.
- MESSENZEHL, K.; HOFFMANN, T.; DIKAU, R. Sediment connectivity in the high-alpine valley of Val Müschauns, Swiss National Park - linking geomorphic field mapping with geomorphometric modelling. **Geomorphology**, v. 221, p. 215-229, 2014.
- MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; CLARKE, R. T. Método “fingerprinting” para identificação de fontes de sedimentos em bacia hidrográfica rural Fingerprinting method for identification of sediment sources in a rural watershed. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 633-638, 2009.
- MISHRA, K. *et al.* Towards the assessment of sediment connectivity in a large Himalayan river basin. **Science of the Total Environment**, v. 661, p. 251-265, 2019.
- NAJAFI, S. *et al.* Sediment connectivity concepts and approaches. **Catena**, v. 196, p. 104880, 2021.

- OLIVEIRA, Leon Dias. **Análise estratigráfica das formações Serra do Catuni e Chapada Acauã inferior, grupo macaúbas, ao longo do paralelo 17°30'S, região Centro-Oeste de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.
- ORTÍZ-RODRÍGUEZ, A. J.; BORSELLI, L.; SAROCCHI, D. Flow connectivity in active volcanic areas: Use of index of connectivity in the assessment of lateral flow contribution to main streams. **Catena**, v. 157, p. 90-111, Oct. 2017.
- PECHENICK, A. M. *et al.* A multi-scale statistical approach to assess the effects of connectivity of road and stream networks on geomorphic channel condition. **Earth surface processes and landforms**, v. 39, p. 1538-1549, 2014.
- PERRY, C.; TAYLOR, K. Environmental Sedimentology. **Journal of Soils and Sediments**, v. 7, n. 6, p. 460, 2007.
- PERSICHILLO, M. G. *et al.* The role of human activities on sediment connectivity of shallow landslides. **Catena**, v. 160, p. 261-274, Jan. 2018.
- PRINGLE, C. M. Hydrologic Connectivity and the Management of Biological Reserves: A Global Perspective. **Ecological Applications**, v. 11, n. 4, p. 981, 2001.
- RATHBURN, S. L.; SHAHVERDIAN, S. M.; RYAN, S. E. Post-disturbance sediment recovery: Implications for watershed resilience. **Geomorphology**, v. 305, p. 61-75, 2018.
- RESEARCH, W. U. **Software LAPSUS**, 2018. Disponível em: <https://www.wur.nl/en/Research-Results/Chair-groups/Environmental-Sciences/Soil-Geography-and-Landscape-Group/Research/LAPSUS/Downloads-and-Updates.htm>. Acesso em: 10 maio 2022.
- RODRIGUES, C. Atributos ambientais no ordenamento territorial urbano. O exemplo das planícies fluviais na Metrópole de São Paulo. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, v. 19, n. 2, p. 324-347, 2015.
- TURNBULL, L.; WAINWRIGHT, J. From structure to function: Understanding shrub encroachment in drylands using hydrological and sediment connectivity. **Ecological Indicators**, v. 98, p. 608-618, Mar. 2019.
- ZANANDREA, F. *et al.* Conectividade dos Sedimentos: Conceitos, Princípios e Aplicações. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 2, p. 0-3, 2020.
- ZANANDREA, F.; KOBIYAMA, M.; MICHEL, G. P. Conectividade Hidrossedimentológica: Uma Abordagem Conceitual. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis, 2017. **Anais [...]**. Porto Alegre : ABRH, 2017. p. 1-8.
- ZINGARO, M. *et al.* Sediment mobility and connectivity in a catchment: A new mapping approach. **Science of the Total Environment**, v. 672, p. 763-775, 2019.

Contribuições de autoria:

Warlen Librelon de Oliveira: Seleção e análise dos modelos encontrados nas referências e construção da tabela 1; definição da metodologia; desenvolvimento dos resultados e discussões com base nos modelos selecionados; revisão e contribuição na introdução; escrita de parte das conclusões.

Marcelo Antonio Nero: Busca das referências para análises e leituras, de acordo com os filtros necessários em função do objetivo do artigo; escrita da introdução a partir do levantamento bibliográfico; revisão da tabela com os modelos analisados; revisão da discussão dos resultados; escrita de parte das conclusões.

Diego Rodrigues Macedo: Estruturação do artigo; contribuição com a metodologia; parte da introdução; levantamento bibliográfico; revisão geral do artigo; escrita de parte das conclusões.

Declaração de financiamento

Esta pesquisa foi apoiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG, bolsa de doutorado para WLO), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, bolsa de produtividade em pesquisa para DRM), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Código de Financiamento 001).

Editor do artigo:

Fernando Villela

Recebido em: 01 nov. 2022
Aprovado em: 22 nov. 2023