

Revisão sistemática sobre o uso da modelagem matemática em monitoramento do transporte de sedimentos e qualidade da água em rios

Systematic review on the use of mathematical modeling in monitoring sediment transport and water quality in rivers

Renata Nalim Basilio Tissi¹, Wagner Rambaldi Telles², Simone Vasconcelos Silva³, Antônio José da Silva Neto⁴

RESUMO

A qualidade da água vem sendo ameaçada por um conjunto de fatores atualmente. O transporte de sedimentos é algo que vem sendo estudado por ser um processo responsável por boa parte da poluição dos rios e oceanos. As mudanças climáticas, erosão e assoreamento dos rios continuam sendo motivo de preocupação e estudos para conter a degradação ambiental. O uso da modelagem matemática na busca por novas soluções e mitigação dos impactos ambientais proporciona a criação de cenários por meio das simulações. Estas podem auxiliar e mostrar cenários bem próximos a realidade, se o modelo for bem calibrado. O objetivo desse trabalho é analisar na literatura o uso da modelagem matemática em monitoramentos do transporte de sedimentos e qualidade da água em rios. Como metodologia, uma revisão sistemática foi realizada para constatar a importância do uso da modelagem matemática nos estudos relacionados ao transporte de sedimentos em rios. Tendo como resultado, vinte e quatro artigos aceitos pós critérios de elegibilidade.

Palavras-chave: Sedimentos. Qualidade da água. Modelagem. Revisão Sistemática

ABSTRACT

Water quality is currently being threatened by a number of factors. Sediment transport is something that has been studied as it is a process responsible for much of the pollution in rivers and oceans. Climate change, erosion and silting of rivers continue to be a cause for concern and studies to contain environmental manipulation. The use of mathematical modeling in the search for new solutions and mitigation of environmental impacts provides the creation of scenarios through simulations. These can help and show scenarios that are very close to reality, if the model is well calibrated. The objective of this work is to analyze the literature on the use of mathematical modeling in monitoring sediment transport and water quality in rivers. As a methodology, a systematic review was carried out to verify the importance of using mathematical modeling in studies related to sediment transport in rivers. Resulting in twenty-four articles accepted following eligibility criteria.

Keywords: Sediments. Water quality. Modeling. Systematic review

¹Doutoranda em Modelagem e Tecnologia para Meio Ambiente Aplicadas em Recursos Hídricos. Instituto Federal Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ. E-mail: nalim.renata@gsuite.iff.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8405-1301>

²Doutor em Modelagem Computacional. Universidade Federal Fluminense, Santo Antônio de Pádua, RJ. E-mail: wtelles@id.uff.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6032-3405>

³Doutora em Computação. Instituto Federal Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ. E-mail: simonevs@iff.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5994-6840>

⁴Doutor em Engenharia Mecânica. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, RJ. E-mail: ajsneto@iprj.uerj.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9616-6093>

1. INTRODUÇÃO

Rios e córregos são sistemas dinâmicos e estão continuamente mudando sua estrutura devido a diferentes condições de fluxo (SHU et al., 2019). As crescentes preocupações com as mudanças climáticas são consideradas uma dimensão importante para o planejamento ambiental (ARGUELLES et al., 2014). De acordo com a Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005, a saúde e o bem-estar humano, bem como o equilíbrio ecológico aquático, não devem ser afetados pela deterioração da qualidade das águas.

Um fator chave para a degradação da qualidade da água nos rios em todo o mundo é o sedimento fino. É necessário um melhor conhecimento de sua fonte e transporte para avaliar a eficácia das opções de controle de sedimentos e estratégias de redução da poluição (STONE et al., 2021). As partículas finas também são consideradas um fator importante na determinação da solidez dos ecossistemas aquáticos, e sua deposição, conhecida como assoreamento, contribui muito para a poluição aquática. Assim, entender a dinâmica dessas partículas finas entre o corpo d'água e o leito do rio é uma questão importante na pesquisa de sedimentos (PARK & HUNT, 2018).

Segundo Shu et al. (2019), a erosão ribeirinha é um processo natural dos rios que pode ser agravado pela ação direta e impactos humanos indiretos. Infelizmente, a degradação das margens dos rios pode causar impactos sociais como perda de propriedade e sedimentação de estruturas no rio, bem como impactos ambientais como impacto na qualidade da água. A erosão é calculada com base no conceito de capacidade de transporte com um termo adicional para a energia dissipada pela navegação fluvial (VILMIN, et al., 2015). Os depósitos de sedimentos do canal nas bacias hidrográficas podem ser divididos em depósitos de planície de inundação de longo prazo e depósitos de sedimentos de leito de rio de curto prazo (STONE et al., 2021).

Promover o entendimento da mobilização e transporte de sedimentos torna-se essencial para entender melhor as pegadas antropogênicas (LIU et al., 2020). O transporte de sedimentos da paisagem agrícola e o assoreamento resultante de rios e reservatórios também causam problemas com outros poluentes ligados a partículas transportadas (principalmente metais) e com a carga de sedimentos, levando a problemas funcionais (perda de capacidade de armazenamento de água, problemas de transporte de água, mudanças no ecossistema) (KRASA et al., 2019).

Nos estudos sobre transporte de sedimentos pode-se tomar diversos tipos de sedimentos. A compreensão científica de como a diminuição dos sedimentos influencia a erosão das margens e a sua interação com a deformação do leito é limitada (JIA et al., 2016).

Portanto, este trabalho trata-se de uma pesquisa qualitativa. A coleta de dados foi realizada segundo protocolos estabelecidos para uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL) a partir de trabalhos publicados (REIS et al., 2023) entre 2013 e 2023. E tem como objetivo analisar na literatura o uso da modelagem matemática em monitoramentos do transporte de sedimentos e qualidade da água em rios.

Nesse contexto, é conduzida uma revisão sistemática na intenção de responder as premissas que irão nortear esse trabalho.

Modelagem Matemática

Modelos matemáticos (analíticos, numéricos e de otimização) são empregados em diversas disciplinas, incluindo planejamento, engenharia e gestão de recursos hídricos (TAYFUR, 2017). Esses modelos são tipicamente resolvidos por cálculos numéricos ou métodos analíticos (DING et al., 2020).

Cada modelo conta com conjuntos específicos de suposições e equações para simular os processos físico-bioquímicos, que influenciam nos resultados de sua simulação. Modelos matemáticos de qualidade da água com base física são conhecidos como ferramentas potencialmente eficazes para simular as variações temporais e espaciais das variáveis de qualidade da água ao longo dos rios (NGUYEN & WILLEMS, 2016).

Quando os dados são limitados, geralmente recorre-se ao uso de modelos para ajudar nas decisões de gerenciamento. Embora modelos baseados em física para transporte de sedimentos estejam disponíveis, eles geralmente são desenvolvidos e usados para o problema relacionado de sedimentos (BATT & STEVENS, 2013).

A descarga baseada em Topografia das Águas Superficiais e dos Oceanos (SWOT) nunca substituirá as medições de descarga *in situ* (DURAND et al. 2016). Os dados de satélite estão disponíveis apenas em condições de céu claro; tais dados são numerosos durante a estação seca, mas menos abundantes durante a estação chuvosa e quase nublada, o que torna difícil estimar balanços de sedimentos apenas por sensoriamento remoto (VINH et al., 2016). Este pode ser um complemento para as simulações numéricas ao estudar a pluma e o transporte de sedimentos. Modelos podem ser propostos como uma

ferramenta útil. Eles podem ser usados no planejamento, projeto e operação de projetos de recursos hídricos (TAYFUR, 2017).

Melhores estimativas de descarga fluvial, com maior cobertura espacial do sistema global de rios, são necessárias para desenvolver a compreensão científica baseada em processos de escoamento em grandes escalas espaciais (ou seja, como a água é direcionada para dentro e através dos rios) para calibrar e restringir os modelos hidrológicos à previsão de efeitos de mudanças futuras no ciclo hidrológico terrestre. (DURAND et al., 2016).

Equações governantes que incorporam a interação entre o fluxo e o transporte de sedimentos foram adotadas para tornar os modelos ainda mais representativos. O conjunto de equações governantes é linearizado, e uma técnica de perturbação singular é implementada (DING et al., 2020). Compreender o mecanismo de fluxo e a morfologia a evolução é crucial para a formação de rios, controle de enchentes, gestão de recursos e melhorias ambientais. Fisicamente, os processos de fluxo e sedimentação, bem como evolução morfológica são inconsistentes no tempo e escalas espaciais. Além disso, as mudanças climáticas e a intervenção humana exacerbaram as inconsistências nas últimas décadas (DING et al., 2020). É fundamental começar a prever o desempenho do algoritmo com base nas características do rio (DURAND et al., 2016).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção encontra-se a metodologia proposta a partir de uma Revisão Sistemática da Literatura orientada pelo modelo de Itens de Relatório Preferenciais para Revisões Sistemáticas e Meta-Análises, (PRISMA) conforme Moher et al. (2009). Para coleta de dados optou-se por pesquisar artigos disponíveis nas bases Scopus e We of Science. As revisões sistemáticas são investigações científicas em si, com métodos pré-planejados e um conjunto de estudos originais como seus "assuntos". Eles sintetizaram os resultados de múltiplas investigações primárias usando estratégias. Essas estratégias incluem uma pesquisa abrangente de todos os artigos ambientalmente relevantes e utilização de critérios explícitos (COOK et al., 1997).

A pesquisa seguiu alguns critérios que deu origem a oito etapas para a elaboração desta revisão sistemática da literatura, são elas: I – Definição do tema de pesquisa; II - Definição das questões de pesquisa; III – Definição do tesouro; IV – Seleção e busca de artigos na base de dados; V- Análise dos artigos selecionados por título e resumo; VI –

Definição dos critérios de elegibilidade; VII – Análise dos artigos completos com aderência ao tema proposto; VIII – Apresentação da revisão sistemática da literatura.

I – Definição do tema de pesquisa

O tema proposto, “Revisão Sistemática sobre o uso da modelagem matemática em monitoramentos do transporte de sedimentos e qualidade da água em rios”, é um tema que abrange a qualidade da água, transporte de sedimentos e o uso de modelos matemáticos em rios.

II – Definição das questões de pesquisa

A partir da escolha do tema da pesquisa algumas premissas foram elaboradas para o êxito do trabalho. Com a determinação das questões de pesquisa: Qual a relação da qualidade da água com o transporte de sedimentos? Como a modelagem matemática poderá auxiliar no estudo sobre qualidade da água em rios? Como a modelagem matemática foi aplicada no monitoramento do transporte de sedimentos e da qualidade da água em rios?

III - Definição do tesouro

O tesouro utilizado foi TITLE-ABS-KEY (water AND quality AND "sediment transport" AND mathematical AND modeling AND river).

IV – Seleção e busca na base de dados

Dentre tantas plataformas de busca, foram selecionadas as bases do Scopus e Web of Science. Com o término da seleção foram encontrados na base da Scopus, 79 publicações e Web of Science 45 publicações que foram analisados para embasar este trabalho.

V – Análise dos artigos selecionados

Para a efetiva inclusão ou exclusão, foram consideradas apenas publicações tipo artigos. Foram incluídos 46 artigos da base Scopus e 33 artigos da base Web of Science. Totalizando 79 artigos que irão passar pelos critérios de elegibilidade.

VI – Definição dos critérios de elegibilidade

Os critérios de elegibilidade foram o idioma, período de publicação nos últimos dez anos (2013-2023), acesso ao texto completo e aderência ao tema proposto. Com aplicação do primeiro critério de elegibilidade, que é o idioma, foram excluídos quatro artigos da base Scopus e um da base We of Science.

A tabela 1 mostra o quantitativo de artigos em cada base de dados de acordo com os critérios de elegibilidade.

Tabela 1 – Resultado da aplicação dos critérios de elegibilidade

	Scopus	We of Science	Total dos excluídos	Total a serem analisados
Idioma	42	32	5	74
Publicação (2013-2023)	15	22	37	37
Texto completo	12	17	7 duplicados 1 solicitado	29
Aderência ao tema proposto	11	13	5	24

Fonte: Os autores (2023).

VII – Análise dos artigos completos com aderência ao tema proposto

Nesta análise, o texto completo deveria ter aderência ao tema proposto: “Revisão Sistemática sobre o uso da modelagem matemática em monitoramentos do transporte de sedimentos e qualidade da água em rios”. A elegibilidade dos 24 artigos foi confirmada por meio da leitura completa. Nesta etapa, cinco artigos foram excluídos por não terem “aderência ao tema proposto”.

VIII – Apresentação da revisão sistemática da literatura

A última etapa é o resultado das análises e elaboração de um trabalho de revisão bibliográfico seguindo alguns critérios de elegibilidade. As etapas de seleção seguiram o fluxo (Figura 1).

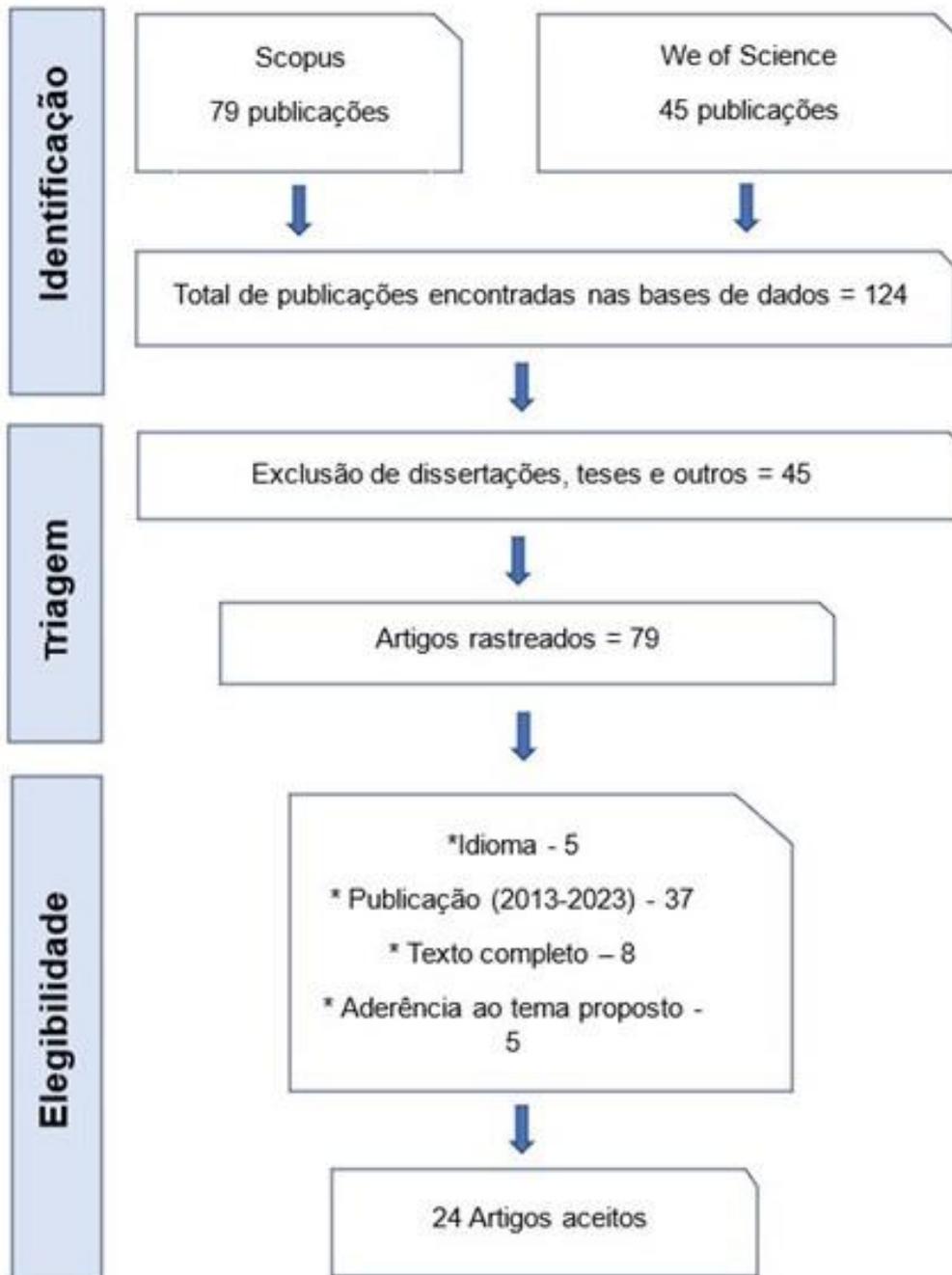


Figura 1 – Prisma, 2023 (Adaptado Método Prisma)

3. RESULTADOS

Por meio de uma busca inicial nas bases de dados, identificou cento e vinte e quatro (124) artigos. Aplicando a recomendação PRISMA, na triagem, foi feita a exclusão de dissertações, teses e etc., totalizando setenta e nove artigos rastreados (79). Passando

pelos critérios de elegibilidade, vinte e quatro (24) artigos foram aceitos. Destes 24 artigos, onze (11) são da base de buscas Scopus e treze (13) da Web of Science.

Na Figura 2 é demonstrado o quantitativo anual no período de publicação adotado (2013-2023):



Figura 2 – Representação do quantitativo de publicações por ano

De acordo com o levantamento, o ano com mais publicações foi 2016, tendo cinco (5) publicações aceitas nessa revisão sistemática. E, nos anos de 2022 e 2023, não apresentaram artigos nos resultados das buscas realizadas em bases de pesquisas Scopus e We of Science.

Nos artigos que compõem a Revisão Sistemática aplicada nesse trabalho, buscou-se responder algumas questões relacionadas ao transporte de sedimentos, qualidade da água e o uso da modelagem matemática. Na sequência, na forma de síntese, contribuições de alguns artigos aceitos após os critérios de elegibilidade para responder às questões norteadoras.

Abaixo, constam 26 contribuições coletadas de alguns artigos aceitos pelos critérios de elegibilidade. As contribuições foram organizadas de acordo com cada pergunta norteadora.

1- Qual a relação entre a qualidade da água com o transporte de sedimentos?

Os sedimentos finos são um fator-chave da degradação da qualidade da água nos rios em todo o mundo e é necessário um melhor conhecimento da sua origem e transporte para avaliar a eficácia das opções de controle de sedimentos e das estratégias de redução da poluição (STONE et al., 2021).

Os sedimentos em suspensão e os poluentes carregados de sedimentos deterioram o estado ecológico de muitas massas de água doce europeias e causam perdas econômicas consideráveis (MERINAA et al., 2019).

O transporte de sedimentos da paisagem agrícola e o assoreamento resultante de rios e reservatórios também causam problemas com outros poluentes transportados ligados a partículas (principalmente metais) e com a carga de sedimentos, levando a problemas funcionais (perda de capacidade de armazenamento de água, problemas de transporte de água, mudanças no ecossistema, etc.) (KRASA et al., 2019).

Partículas finas ou sedimentos têm vários efeitos na qualidade da água e nos ecossistemas aquáticos. Por isso, compreender a dinâmica dessas partículas finas entre o corpo d'água e o leito do rio é uma questão importante na pesquisa de sedimentos (PARK et al., 2018).

Sedimentos, nutrientes e poluentes descarregados das áreas de erosão laminar e entre sulcos por fluxos impactados pela chuva podem influenciar a qualidade da água em córregos e rios (KINNELL 2013).

O excesso de sedimentos nas águas superficiais causa problemas para a vida aquática, aumentando a turbidez e destruindo o habitat; aumenta os custos de tratamento para estações de tratamento de água potável, usuários industriais e alguns usuários agrícolas; e reduz as oportunidades recreativas (JANG et al., 2013).

As mudanças climáticas podem aumentar a intensidade das chuvas e causar um aumento ainda maior no transporte de sedimentos em terras áridas, o que, por sua vez, pode afetar negativamente a qualidade da água. Portanto, há uma forte necessidade de prever o destino dos sedimentos, a fim de fornecer medidas para o controle da erosão e gestão da qualidade da água (ARGUELLES et al., 2014).

A concentração de sedimentos do rio afeta diretamente a transparência e as condições de luz da massa de água, afetando, assim, o crescimento dos animais e plantas flutuantes (LU et al., 2020).

A dinâmica dos sedimentos tem impactos consideráveis, não só em termos de geomorfologia, mas também em termos de ciclos geoquímicos, biogeoquímica, microbiologia, destino da contaminação por metais, ambiente bêntico, recifes de coral e ervas marinhas comunidades (VINH et al., 2016).

No campo da hidrologia computacional, a modelagem de sedimentos e qualidade da água é uma tarefa desafiadora (MESHRAM et al., 2021).

O excesso de nutrientes levou ao aparecimento de eutrofização e à proliferação massiva de algas nocivas (HUANG et al., 2016).

Rios subterrâneos, nascentes e poços são potencialmente contaminados pelo solo, matéria orgânica e metais pesados da superfície (WU et al., 2021).

A perda difusa de nutrientes é uma séria ameaça à segurança hídrica e deteriorou gravemente a qualidade da água em todo o mundo (ZHAI & ZHANG, 2018).

2- Como a modelagem matemática poderá auxiliar no estudo sobre qualidade da água em rios?

As características de transporte (deposição, erosão e floculação) de sedimentos finos foram estudadas experimentalmente em uma calha anular para fornecer os parâmetros necessários para modelar o transporte de sedimentos finos na parte superior do Rio Taw, no sudoeste da Inglaterra (STONE et al., 2021).

Nos estudos recentes, modelos matemáticos avançados estão sendo usados para prever os processos hidrológicos, como uso da terra, sedimentação, mudanças climáticas e outros aspectos geológicos (MERINAA et al., 2019).

Vários modelos podem ser usados para modelar a erosão e o transporte de sedimentos. Eles diferem no mecanismo de computação e no número de entradas necessárias (KRASA et al., 2019).

Modelos matemáticos de qualidade da água com base física são conhecidos como ferramentas potencialmente eficazes para simular as variações temporais e espaciais das variáveis de qualidade da água ao longo dos rios (NGUYEN et al., 2016).

O estudo no lago Mud Lake, localizado ao norte das cidades de Montpelier e Paris no sudeste de Idaho, explora o uso da modelagem de máquina de vetor de relevância multivariável (MVRVM) para prever sedimentos finos suspensos e outras concentrações de constituintes da qualidade da água e sua distribuição espacial e temporal (BATT & STEVENS, 2013).

Em regiões áridas ocorrem ciclos de seca, sendo eles sazonais ou anuais. Isso acarreta ao solo uma enorme erosão. Os solos em terras áridas que são mais vulneráveis à erosão, no entanto, são facilmente depositados em rios e mares durante chuvas fortes. A partir dessas afirmações, fica muito claro que a mudança climática está fortemente relacionada à erosão e ao transporte de sedimentos. Portanto, a pesquisa sobre modelos de transporte de sedimentos de erosão é crítica para o controle da erosão e gestão da qualidade da água. Na modelagem de processos de encostas, a influência da microtopografia no fluxo superficial, bem como na erosão e no transporte de sedimentos é de grande importância (ARGUELLES et al., 2014).

O modelo numérico de média espacial mostra flexibilidade suficiente para explicar várias propriedades de sedimentos, incluindo diferentes fontes de sedimentos, contaminantes naturais e artificiais, presença ou ausência de organismos aquáticos e resulta em um coeficiente médio de determinação, $R^2 = 90,5\%$ entre os resultados do modelo e os dados experimentais (SKULOVICH et al., 2017).

3- Como a modelagem matemática foi aplicada no monitoramento do transporte de sedimentos e da qualidade da água em rios?

A influência da tensão de cisalhamento do leito e da consolidação do leito foi investigada em uma série de experimentos de erosão. Esses dados foram utilizados para calibrar e testar um modelo matemático de transporte de sedimentos finos em calhas anulares (modelo FLUME) e os dados medidos e modelados estavam em boa concordância. Os dados dos experimentos na calha são necessários como parâmetros de entrada para modelos como RIVFLOC ou SHETRAN que simulam o transporte de sedimentos finos no Rio Taw na escala da bacia hidrográfica e avaliam a eficácia das opções de controle de sedimentos e cenários de gestão da bacia hidrográfica (STONE et al., 2021).

O modelo Ferramenta de Avaliação de solo e Água (SWAT) foi utilizado em um trabalho que trata da avaliação da sedimentação no reservatório Vaigai situado no estado de Tamilnadu, Índia. O modelo é usado para simular a área de captação do reservatório de Vaigai para a quantidade de água e fluxo de sedimentos para o reservatório. A comparação foi realizada para valores previstos e observados. A modelagem hidrológica da bacia de Vaigai foi realizada usando o ArcSWAT. Os arquivos de dados são preparados e usados como entrada para estudo de simulação. No entanto, a aplicação do SWAT a grandes

bacias hidrográficas continua a ser um desafio por várias razões, não apenas por causa das altas demandas computacionais. (MERINAA et al., 2019).

Cada modelo conta com conjuntos específicos de suposições e equações para simular os processos físico-bioquímicos, que influenciam nos resultados de sua simulação (NGUYEN et al., 2016).

O esforço de modelagem em uma resolução tão fina considerando a conexão de fluxo entre áreas “interrill” e “rills” raramente é verificado. O modelo desenvolvido foi aplicado a um conjunto de dados recolhidos a partir de uma montagem experimental onde foi pré-formada uma calha de erosão de 650 cm x 136 cm com um sulco longitudinal e entre sulcos de geometria plana e foi equipado com um simulador de chuva que reproduz a precipitação natural características (ARGUELLES et al., 2014).

A modelagem do transporte de sedimentos é necessária para questões no contorno do transporte de sedimentos em canais, lagoas e baías, estações estáveis e barragens, repositórios de barragens, proteção dos peixes, efeito da administração da bacia hidrográfica e avaliação do efeito ecológico (MESHRAM et al., 2021).

Mediante análise dos artigos aceitos, observa-se que existe uma variedade de modelos hidrodinâmicos. Estes são úteis na modelagem matemática para resolver problemas reais ou simular problemas hipotéticos.

Nesta Revisão Sistemática, 24 artigos foram aceitos por meio dos critérios de elegibilidade. O modelo mais utilizado foi o SWAT, 12% dos artigos aceitos.

4. DISCUSSÕES

4.1. Relação da qualidade da água com o transporte de sedimentos

Percebe-se que a presença e o transporte de sedimentos finos influenciam na qualidade da água. A deposição de sedimentos é a tendência das partículas em suspensão de se desprenderem do fluido no qual são arrastadas e repousarem contra uma barreira (MERINAA et al., 2019). A erosão do solo e a turbidez podem ser indicadores um do outro, sendo a turbidez capaz de prever a concentração de sedimentos suspensos em águas subterrâneas, enquanto os modelos de erosão servem para mostrar a turbidez da água (WU et al., 2021).

À medida que a área conservada aumenta dentro de uma bacia hidrográfica, pode-se esperar uma diminuição (melhoria) correspondente na resposta hidrológica. A resposta

hidrológica aprimorada resulta em velocidades de fluxo reduzidas e, conseqüentemente, carga de sedimentos reduzida (JANG et al., 2013).

Frequentemente, a erosão laminar e entre sulcos remove o material da superfície que é rico em nutrientes e poluentes, resultando na entrada de sedimentos nos rios e córregos que afetam negativamente a qualidade da água (KINNELL, 2013). A perda difusa de nutrientes tem sido reconhecida como um dos principais contribuintes para a deterioração da qualidade da água e tem ganhado preocupações crescentes em todo o mundo, especialmente em um contexto de mudança climática global, que representa grandes desafios para o ambiente aquático global e a gestão sustentável dos recursos hídricos (ZHAI & ZHANG, 2018).

A carga de sedimentos suspensos é uma porção substancial da carga total de sedimentos nos rios e desempenha um papel vital na determinação da vida útil da barragem a jusante (MESHRAM et al., 2021). A degradação da qualidade da água exige que os formuladores de políticas tomem ações corretas de remediação. Perguntas devem ser respondidas, como a qualidade da água, onde as águas superficiais estão poluídas e quais fontes causam estresse aos rios (NGUYEN & WILLEMS, 2016).

A concentração de sedimentos do rio afeta diretamente as condições de transparência e luminosidade do corpo d'água, afetando o crescimento dos animais e plantas flutuantes (LU et al., 2020). Deve-se usar seletivamente o medidor de turbidez para monitorar a concentração de sedimentos da água subterrânea no campo. Quando a concentração de sedimentos é grande, escolhe-se outros métodos de monitoramento (WU et al., 2021).

Os artigos selecionados destacam que a presença e o transporte de sedimentos influenciam na qualidade da água. Isso traz algumas conseqüências, como: aumento da poluição, ameaça para a biota existente nesses ambientes, erosão do solo, assoreamento dos rios, entre outras. Como indicadores da presença de sedimentos nos corpos hídricos a turbidez e a erosão, são exemplos. A turbidez indica a concentração de sedimentos suspensos, enquanto a erosão remove a camada superficial do solo rico em nutrientes e carregado de poluentes. Esse processo resulta na entrada de sedimentos nos rios, comprometendo, assim, a qualidade da água.

4.2. Modelagem matemática auxilia o estudo sobre qualidade da água em rios

Nos estudos recentes, modelos matemáticos avançados estão sendo usados para prever os processos hidrológicos, como uso da terra, sedimentação, mudanças climáticas e outros aspectos geológicos (MERINAA et al., 2019).

Vários modelos podem ser usados para modelar a erosão e o transporte de sedimentos. Eles diferem no mecanismo de computação e no número de entradas necessárias (KRASA et al., 2019). Modelos matemáticos de qualidade da água com base física são conhecidos como ferramentas potencialmente eficazes para simular as variações temporais e espaciais das variáveis de qualidade da água ao longo dos rios (NGUYEN et al., 2016).

Percebe-se que os modelos matemáticos são construídos e utilizados para simularem processos hidrológicos, transporte de sedimentos em rios e mares, etc. Esses modelos são potencialmente usados em estudos que envolvem os corpos hídricos por possuir eficácia ao modelar as constantes variações da qualidade da água.

4.3. Modelagem matemática aplicada no monitoramento do transporte de sedimentos e da qualidade da água em rios

Existem vários modelos que utilizam equações para realizar a modelagem matemática. Dentre eles, o modelo Ferramenta de Avaliação de Solo e Água (SWAT). Consta-se que em três dos vinte e quatro artigos desta revisão o modelo foi utilizado.

A modelagem do transporte de sedimentos é necessária para questões no contorno do transporte de sedimentos em canais, lagoas e baías, estações estáveis e barragens, repositórios de barragens, proteção dos peixes, efeito da administração da bacia hidrográfica e avaliação do efeito ecológico (MESHRAM, et al., 2021).

Dentre os artigos aceitos, constata-se que existem vários modelos que utilizam equações para realizar a modelagem matemática. No entanto, a aplicação do SWAT e outros modelos em bacias hidrográficas vêm acompanhado de desafios. Isso inclui altas demandas computacionais, domínio do modelo e conhecimento da área onde o modelo será aplicado.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma revisão sistemática foi realizada para constatar a importância do uso da modelagem matemática nos estudos relacionados ao transporte de sedimentos e qualidade da água em rios.

Com isso, criou-se uma visão mais abrangente sobre o assunto abordado. Por meio deste trabalho foi possível perceber como que o transporte de sedimentos influencia na qualidade da água em rios.

Por fim, observa-se a importância da modelagem matemática nos estudos sobre transporte de sedimentos e qualidade da água nos corpos hídricos. O assunto é de interesse de muitos pesquisadores e torna-se um desafio compreender todo o processo hidrológico.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPERJ, Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, e da CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Código de Financiamento 001).

REFERÊNCIAS

ARGUELLES, A. C.; JUNG, M.; MALLARI, K. B.; PAK, G.; AKSOY, H.; KAVVAS, M.; ERIS, E.; YOON, J.; LEE, Y.; HONG, S. Evaluation of an erosion-sediment transport model for a hillslope using laboratory flume data. **Journal of Arid Land**, v. 6, n. 6, 2014.

BATT, H. A.; STEVENS, D. K. Relevance Vector Machine Models of Suspended Fine Sediment Transport in a Shallow Lake: Data Collection. **Environmental Engineering Science**, v. 30, n. 11, 2013.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005**. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcdaltrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf>. Acesso em: 06 fev. 2024.

COOK D. J., MULROW C. D., HAYNES R. B. Systematic reviews: synthesis of best evidence for clinical decisions. **Ann Intern Med.**, v. 126, n.5, p. 376–380, 1997.

DING, Y.; LI, Z.; SHI, Y.; ZHONG, D. Analytical solution to one-dimensional mathematical model of flow and morphological evolution in open channels. **Science China Technological Sciences**, v. 63, p. 2606–2616, 2020.

DURAND, M.; GLEASON, C. J.; GARAMBOIS, P. A.; BJERKLIE, D.; SMITH, L. C.; ROUX, H.; RODRIGUEZ, E.; BATES, P. D.; PAVELSKY, T. M.; MONNIER, J.; CHEN, X.; BALDASSARRE, G. DI; FISET, J. M.; FLIPO, N.; FRASSON, R. P. D. M.; FULTON, J.; GOUTAL, N.; HOSSAIN, F.; HUMPHRIES, E.; MINEAR, J. T.; MUKOLWE, M. M.; NEAL, J. C.; RICCI, S.; SANDERS, B. F.; SCHUMANN, G.; SCHUBERT, J. E.; VILMIN, L. An intercomparison of remote sensing river discharge estimation algorithms from measurements of river height, width, and slope, **Water Resources Research**, v. 52, p. 4527–4549, 2016.

TAYFUR, G. Modern Optimization Methods in Water Resources Planning, Engineering and Management. **Water Resour Manage**, v. 31, p. 3205–3233, 2017.

JANG, T.; VELLIDIS, G.; HYMAN, J. B.; BROOKS, E.; KURKALOVA, L. A. Model for Prioritizing Best Management Practice Implementation: Sediment Load Reduction. **Environmental Management**, v. 51, p. 209–224, 2013.

JIA, D.; SHAO, X.; ZHANG, X.; LU, Y.; HEI, P. Morphological responses in a meandering and island-braided reach of the Middle Yangtze River to the Three Gorges Reservoir impoundment. **International Journal of Sediment Research**, v. 31, n. 2, p. 131-138, 2016.

KINNELL, P. I. A. Modeling of the effect of flow depth on sediment discharged by rain-impacted flows from sheet and interrill erosion areas: a review. **Hydrological Processes**, v. 27, p. 2567–2578, 2013.

KRASA, J.; DOSTAL, T.; JACHYMOVA, B.; BAUER, M.; DEVATY, J. Soil erosion as a source of sediment and phosphorus in rivers and reservoirs – Watershed analyses using WaTEM/SEDEM. **Environmental Research**, v. 171, p. 470–483, 2019.

HUANG, L.; FANG, H.; HE, G.; JIANG, H.; WANG, C. Effects of internal loading on phosphorus distribution in the Taihu Lake driven by wind waves and lake currents. **Environmental Pollution**, v. 219, p. 760–773, 2016.

HUANG, L.; FANG, H.; REIBLE, D. Mathematical model for interactions and transport of phosphorus and sediment in the Three Gorges Reservoir. **Water Research**, v. 85, p. 393-403, 2020.

LIU, X.; ZHANG, H.; ZHENG, J.; GUO, L.; JIA, Y.; BIAN, C.; LI, M.; MA, L.; ZHANG, S.; Critical role of wave–seabed interactions in the extensive erosion of Yellow River estuarine sediments. **Marine Geology**, v. 426, p. 106–208, 2020.

LU, X.; WANG, X.; BAN, X.; SINGH, V. P. Transport characteristics of non-cohesive sediment with different hydrological durations and sediment transport formulas, **Journal of Hydrology**, v. 591, 2020.

MERINAA, R. N.; SASHIKKUMAR, M. C.; DANESH, A.; RIZVANA, N. Modelling Technique for Sediment Evaluation at Reservoir (South India). **Water Resources**, v. 46, n.4, p. 553–562, 2019.

MESHARAM, S. G.; SAFARI, M. J. S.; KHOSRAVI, K.; MESHARAM, C. Iterative classifier optimizer-based pace regression and random forest hybrid models for suspended sediment load prediction. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 11637–11649, 2021.

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G. PRISMA Group. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. **Ann Intern. Med.**, v. 151, n. 4, p. 264–269, 2009.

NGUYEN, T. T.; WILLEMS, P. The Influence of Model Structure Uncertainty on Water Quality Assessment. **Water Resour Manage**, v. 30, p. 3043–3061, 2016.

PARK, J.; HUNT, J. R. **Modeling fine particle dynamics in gravel-bedded streams: Storage and re-suspension of fine particles**. Science of The Total Environment, v. 634, p. 1042–1053, 2018.

REIS, C.; HELEODORO, M.; RAMOS JÚNIOR, M.; VIEIRA, C.; SABA, H.; MOREIRA, D.; ALMEIDA, E.; NASCIMENTO FILHO, A. Uma Revisão Sistemática dos Indicadores da Saúde e Bem-Estar no Brasil: Cenário Atual e Perspectivas Futuras da Agenda 2030. **Revista Cereus**, v. 15, n. 1, 2023.

SHU, A.; DUAN, G.; RUBINATO, M.; TIAN, L.; WANG, M.; WANG, S. An Experimental Study on Mechanisms for Sediment Transformation Due to Riverbank Collapse. **Water**, v. 11, 2019.

SKULOVICH, O.; COFALLA, C.; GANAL, C.; SCHÜTTRUMPF, H.; OSTFELD, A. Modelling of resuspension due to fish activity: Mathematical modeling and annular flume experiments. **International Journal of Sediment Research**, v.32, n. 3, p. 421–431, 2017.

STONE, M.; KRISHNAPPAN, B. G.; GRANGER, S.; UPADHAYAY, H. R.; ZHANG, Y.; CHIVERS, C. A.; DECENT, Q.; COLLINS, A. L. Deposition and erosion behaviour of cohesive sediments in the upper River Taw observatory, southwest UK: Implications for management and modelling, **Journal of Hydrology**, v. 598, 2021.

VILMIN, L.; FLIPO, N.; FOUQUET, C.; POULIN, M.; Pluri-annual sediment budget in a navigated river system: The Seine River (France). **Science of The Total Environment**, v. 502, p. 48–59, 2015.

VINH, V. D.; QUILLON, S.; THAO, N. V.; TIEN, N. N. Numerical Simulations of Suspended Sediment Dynamics Due to Seasonal Forcing in the Mekong Coastal Area. **Water**, v. 8, 2016.

WU, Q.; LIANG, H.; XIONG, K.; LI, R. Effectiveness of monitoring methods for soil leakage loss in karst region. **Environmental Earth Sciences**, v. 80, 2021.

ZHAI, X.; ZHANG, Y. Impact assessment of projected climate change on diffuse phosphorous loss in Xin'anjiang catchment, China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 4570–4583, 2018.