



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Desafios e Alternativas na Simulação da Dinâmica Hidrológica e Sedimentológica em Sistemas Cársticos

André Silva Tavares¹, Matheus Santiago Vieira², Elias Soares Uagoda³

¹Doutorando em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Instituto de Geociências, ICC, Ala Central, AT- 321/9, lado B, CEP 70297-400, Brasília, DF. (35) 991721675 andresttavares@gmail.com (autor correspondente).

²Mestrando em Geografia, Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Instituto de Ciências Humanas, Departamento de Geografia, GEA ICC Norte, 900, CEP 70.910-900, Brasília, DF (61) 3107-7498. E-mail: teumice@gmail.com

³Professor Dr. Adjunto III, Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Instituto de Ciências Humanas, Departamento de Geografia, GEA ICC Norte, 900, CEP 70.910-900, Brasília, DF (61) 3107-7498 rogeriouagoda@unb.br.

Artigo recebido em 12/02/2023 e aceito em 30/06/2023

RESUMO

As pesquisas que visam desenvolver métodos para a simulação da dinâmica hidrológica e sedimentológica em bacias hidrográficas dominadas por feições cársticas são ainda escassas no Brasil. A complexidade dos processos simultâneos de infiltração rápida e lenta dificultam a modelagem desses sistemas, principalmente na calibração e sensibilidade dos parâmetros dos modelos, bem como as dificuldades e custos elevados em termos de monitoramento. Este estudo reúne pesquisas na temática da simulação de processos hidrológicos e sedimentológicos em meios cársticos nas últimas duas décadas, considerando diferentes vertentes de análises. Os trabalhos foram compilados a partir do grau de relevância científica, com base na teoria do enfoque meta-analítico consolidado, um método de abordagem exploratória que consiste na seleção dos termos de pesquisa e base de dados, refinamento e agrupamento dos artigos mais relevantes nos últimos anos. Os resultados apontaram para um aumento expressivo de trabalhos que usaram modelos convencionais adaptados ou modificados para simular processos hidrológicos no cárste, principalmente na integram modelos de superfície e subterrâneos. Contudo, os desafios postos são referentes à disponibilidade de dados e dificuldades de monitoramento, o que limita a avaliação dos processos hidrossedimentológicos no cárste subterrâneo. No cárste de superfície alguns modelos simplificados são usados para analisar a contribuição dos sedimentos produzidos e transportados para as áreas de convergência das cavernas e no interior das mesmas.

Palavras-chave: Hidrologia cárstica. Modelagem Hidrológica. Geomorfologia cárstica

Challenges and Alternatives in the Simulation of Hydrological and Sedimentological Dynamics in Karst Systems

ABSTRACT

Research aimed at developing methods for simulating hydrological and sedimentological dynamics in watershed dominated by karst features are still scarce in Brazil. The complexity of the simultaneous processes of fast and slow infiltration make the modeling of these systems difficult, mainly in the calibration and sensitivity of the model parameters, as well as the difficulties and high costs in terms of monitoring. This study brings together research on the simulation of hydrological and sedimentological processes in karst environments in the last two decades, considering different aspects of analysis. The works were compiled based on the degree of scientific relevance, based on the theory of the consolidated meta-analytical approach, an exploratory approach method that consists of selecting search terms and database, refining and grouping the most relevant articles in the last years. The results pointed to a significant increase in works that used adapted or modified conventional models to simulate hydrological processes in the karst, mainly in the integration of surface and underground models. However, the challenges posed are related to the availability of data and monitoring difficulties, which limits the evaluation of hydro-sedimentological processes in the underground karst. In the surface karst some simplified models are used to analyze the contribution of the sediments produced and transported to the convergence areas of the caves and inside them.

Keywords: Karst Hydrology. Hydrological Modelling. Karst Geomorphology

Introdução

Para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, é fundamental obter um conhecimento abrangente das suas particularidades. Isso implica compreender o potencial desses recursos para o abastecimento de água potável, sua sensibilidade a períodos de seca e cheia, bem como sua vulnerabilidade à contaminação (Hartmann et al., 2014).

As águas subterrâneas são armazenadas em poros e fraturas de rochas, percorrendo uma trajetória que abrange desde a zona não saturada, onde os poros são parcialmente preenchidos por água e ar, até alcançar zonas mais profundas por meio da ação da gravidade, onde os poros da zona saturada ficam completamente preenchidos (Manziona et al., 2017). O volume de armazenamento dessas águas é influenciado pela porosidade do aquífero, que pode ser de natureza granular, fissural e/ou cárstica (Goldscheider et al., 2007).

Os aquíferos cársticos são predominantemente compostos por rochas carbonáticas que passam por um processo de dissolução quando em contato com águas acidificadas. A presença de águas ácidas varia em função da disponibilidade de dióxido de carbono na atmosfera e da decomposição de matéria orgânica no solo (Jeannin et al., 2021). Essa variação tem influência direta na velocidade com que ocorre a dissolução da rocha, resultando na formação de feições superficiais e subterrâneas, tais como cavernas, condutos e galerias (Iritani, Ezaki, 2009).

A compreensão da dinâmica hidrológica dos sistemas cársticos é de extrema importância para a gestão sustentável desse recurso natural, uma vez que essas regiões correspondem a aproximadamente 12% da superfície terrestre e cerca de 25% da população mundial depende do abastecimento proveniente desses aquíferos (Kalhor et al., 2019).

De acordo com Karmann (2016), a avaliação das particularidades de um sistema cárstico envolve a combinação de quatro subsistemas universais: 1) o sistema geoquímico, que abrange a interação entre a água e a rocha; 2) o sistema hidrológico, que engloba os processos de absorção, armazenamento e transmissão da água; 3) o sistema geomorfológico, que está relacionado às variações topográficas; e 4) o sistema deposicional, que se refere aos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos.

Do ponto de vista hidrológico, os aquíferos cársticos tendem a apresentar um grande volume de água subterrânea, devido ao desenvolvimento de uma porosidade secundária bem desenvolvida, como fraturas e fissuras, resultantes de processos tectônicos e de carstificação, além da porosidade primária alargada, proveniente da formação da rocha carbonatada (Vigiak et al., 2015).

Segundo Ford e Williams (2007), os sistemas cársticos apresentam dualidades em relação aos processos de recarga, podendo ocorrer de forma autóctone, por meio de fissuras e fraturas, ou de forma alóctone, com a entrada de águas provenientes de áreas adjacentes. Da mesma forma, os sistemas de infiltração podem ocorrer de maneira difusa e superficial ou concentrada, em fluxos capturados por sumidouros.

Os fluxos subterrâneos também apresentam dualidades, podendo ocorrer em baixa velocidade e com grande capacidade de armazenamento ou em alta velocidade, através da rede de canais e condutos. Já os sistemas de descarga podem ser difusos em ambientes de baixa permeabilidade ou concentrados na rede de canais nas ressurgências (Cheng et al., 2023).

Além disso, os fluxos e armazenamentos de água ocorrem em diferentes áreas do aquífero. A zona não saturada, ou vadosa, é a camada superior do aquífero, caracterizada por uma drenagem rápida através da rede vertical de fissuras e uma drenagem mais lenta nas camadas de solo com baixa permeabilidade (Jeannin et al., 2021).

O epicárste é a parte superior da zona vadosa, que evolui de acordo com os processos de intemperismo e apresenta diferentes espessuras. Ele possui alta condutividade hidráulica até a base, onde armazena temporariamente água e drena rapidamente em direção a condutos verticais mais largos. A zona saturada é a porção mais profunda, onde os fluxos ocorrem através de uma rede de condutos conectados às nascentes (Nikolaidis et al., 2013).

Em algumas regiões, ocorre recarga e dissolução ascendente, devido à pressão hidrostática (cárste hipogênico). No entanto, o mais comum é o contato entre águas meteóricas, que possuem abundância de dióxido de carbono, e as rochas carbonáticas (cárste epigênico) (Travassos, 2019).

Além disso, a contribuição de águas provenientes de outras bacias ou de cárstes

superiores, com diferentes níveis de transmissividade, é um fator que torna a dinâmica hídrica no cárste ainda mais heterogênea. Isso pode resultar em alterações na dinâmica dos sedimentos, impactando o habitat aquático em termos de turbidez, penetração de luz, temperatura da água, disponibilidade de oxigênio e transporte de poluentes adsorvidos (Amin et al., 2017).

As águas subterrâneas cársticas são altamente vulneráveis à degradação devido à intensa interação com as águas superficiais, caracterizada por altas velocidades de fluxo e infiltração (Mahler et al., 2021). Essa vulnerabilidade é agravada em regiões onde mudanças no uso e cobertura da terra afetam o equilíbrio natural, como é o caso do crescimento da urbanização e da agropecuária, que oferecem riscos significativos de contaminação. Esses ambientes possuem baixa capacidade de depuração e

neutralização de poluentes (Ballesteros et al., 2023). Um exemplo desse impacto é a poluição por nitrato, que pode resultar no aumento de pragas e doenças na flora e fauna, além de representar riscos para a saúde humana, como danos ao DNA (Bao et al., 2023).

As características da hidrologia cárstica mencionadas até o momento evidenciam a complexidade e os desafios envolvidos na simulação da dinâmica desses processos evolutivos nesses ambientes. A heterogeneidade hidráulica presente nesses sistemas ainda é pouco caracterizada no Brasil, e os dados de monitoramento disponíveis são insuficientes para a construção de modelos conceituais (Figura 1). Os modelos conceituais descrevem de forma conceitual a estrutura dos processos hidrológicos, a partir dos dados obtidos por meio do monitoramento (Sezen et al., 2019).

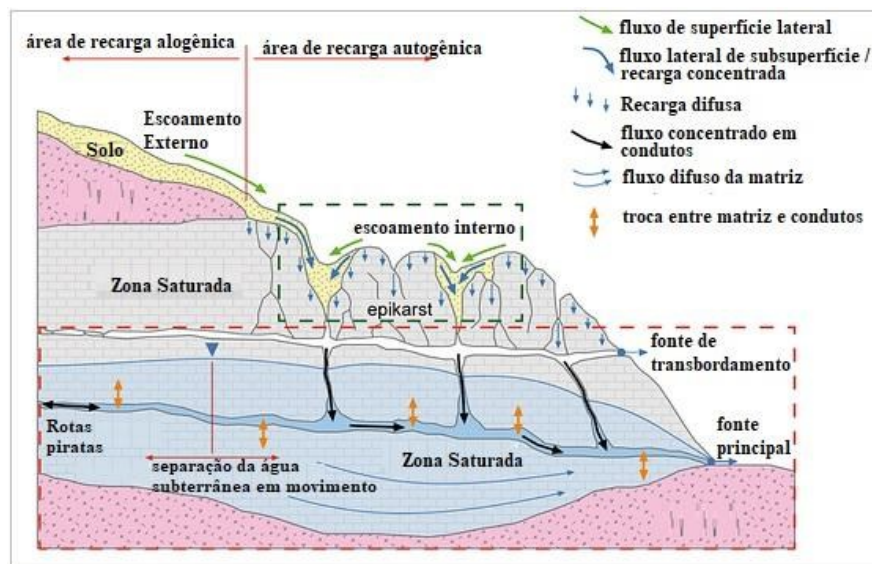


Figura 1. Modelo conceitual de um sistema cárstico. Fonte: Adaptado de Hartmann et al. (2014).

Para suprir a escassez de dados provenientes de monitoramentos dispendiosos, têm sido adotadas diferentes técnicas e ferramentas que foram adaptadas de modelos convencionais utilizados originalmente na simulação da dinâmica hidrológica e sedimentológica em bacias não-cársticas (Torre et al., 2023).

Modelos como o SWAT (Ferramenta de Avaliação de Solo e Água), o MODFLOW (Modelo Hidrogeológico de Fluxo Modular por Diferenças Finitas) e o MIKE SHE (Modelo Conceitual Integrado de Simulação Hidrológica) estão sendo modificados e incorporando novos algoritmos por meio de métodos hidráulicos, geofísicos, hidrogeológicos e técnicas de rastreamento de rotas com o uso de traçadores

naturais e artificiais (Rozos, Koutsoyiannis, 2006; Fleury et al., 2007; Tzoraki e Nikolaidis, 2007; Zhang et al., 2010).

No entanto, a simulação da dinâmica hídrica no cárste ainda provoca incertezas e erros, principalmente na avaliação de qual o modelo mais apropriado a ser usado (Kalhor et al., 2019). Mas, com os avanços de técnicas computacionais e uma base robusta de dados de monitoramento, algumas pesquisas tem alcançado resultados satisfatórios (Partington et al., 2012; Nikolaidis et al., 2013; Hartmann et al., 2014; Wu et al., 2016; Sullivana et al., 2019).

Por outro lado, em regiões com a ausência de dados de monitoramento, modelos que simulam a produção de sedimentos na superfície são usados

para prever o volume de material direcionado para as feições cársticas, em áreas de convergência, como dolinas e cavernas (Betrie et al., 2011, Yan et al., 2013, Woodbury et al., 2014, Vigiak et al., 2015, Volk et al., 2017).

Portanto, com o objetivo de ponderar sobre as dificuldades e potencialidades do uso de modelos na simulação de processos hidrológicos em bacias cársticas, este estudo reuniu as pesquisas mais relevantes na temática considerando um recorte temporal dos últimos vinte anos. A estratégia para reunir os estudos mais relevantes do tema seguiu a Teoria do Enfoque Meta Analítico Consolidado (TEMAC), uma metodologia proposta por Mariano e Rocha (2017).

O aumento expressivo de trabalhos sobre a simulação de processos hidrossedimentológicos em bacias cársticas corrobora com a hipótese da evolução do tema em meio ao avanço das técnicas computacionais (Bresinsky et al., 2023).

Material e métodos

Método de Análise

A Teoria do Enfoque Meta Analítico Consolidado (TEMAC) é um método de análise exploratória quantitativa que consiste em três etapas essenciais: 1) preparação das bases a serem pesquisadas; 2) verificação das inter-relações entre os dados encontrados usando as leis da bibliometria; e a 3) apresentação e interrelação dos

dados, detalhamento, modelo integrador e verificação por evidências (Mariano, Rocha, 2017).

A primeira etapa consiste em selecionar os termos de pesquisa, indicar o recorte temporal e selecionar a base de dados. Nesse estudo a “Web of Science” foi utilizada considerando um recorte temporal entre 2000 e 2020. As palavras-chave foram “hydrological modeling” e “karst systems”, considerando as áreas de pesquisa em geociências, recursos hídricos e geografia física.

A segunda etapa consistiu em refinar a seleção dos principais artigos a partir dos seguintes parâmetros: a) revistas mais relevantes, b) revistas que mais publicam sobre o tema, c) evolução do tema ano a ano, d) documentos mais citados, e) autores que mais publicaram e foram mais citados, f) países que mais publicaram, g) conferências que mais contribuíram, h) universidades que mais publicaram, i) agências que mais financiam a pesquisa, j) áreas que mais publicam, e l) frequência de palavras-chave.

A terceira etapa é o detalhamento do modelo integrador e a validação por evidências, a partir da criação de agrupamentos usando as análises de “co-citação” e “acoplamento bibliográfico” (Figura 2). Essa fase possibilita encontrar núcleos de pesquisa comum, a partir da conexão entre artigos que citam as mesmas publicações dentro do recorte temporal, com auxílio do programa VOSViewer (1.6.15.0).

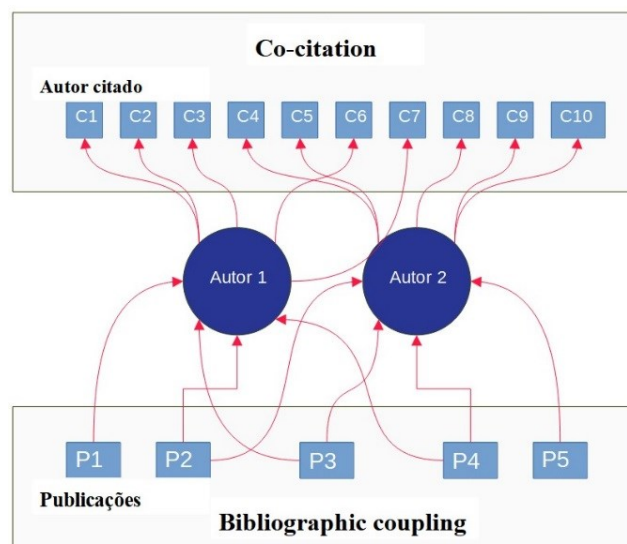


Figura 2: Representação das análises de “co-citação” e “acoplamento bibliográfico”. Fonte: Autores.

A análise de “acoplamento bibliográfico” constitui na verificação das principais frentes de pesquisa no tema, com uma abordagem retrospectiva (sincrônica), ao passo que a co-citação, revelam as principais abordagens ao

conectar os artigos quando citados ao mesmo tempo na literatura, com característica prospectiva (diacrônica) (Grácio, 2016). O programa VOSviewer (1.6.10) permitiu a criação de mapas de calor a partir do banco de dados, formando

cluster entre autores de acordo as vertentes de estudo (Oliveira et al., 2020).

Por fim, foi realizada a Análise Fatorial Confirmatória (AFC), um método que permite encontrar segmentos de classes em unidades comuns, através de análise qualitativa dos dados quantitativos encontrados na busca anterior, por meio do programa Iramuteq (<http://www.iramuteq.org/>).

Resultados e discussão

- Teoria do Enfoque Meta Analítico Consolidado.

Foram realizadas etapas rigorosas de seleção e análise para investigar os trabalhos mais relevantes sobre a modelagem hidrológica em meios cársticos. Inicialmente, uma busca abrangente resultou em um total de 344 trabalhos. Esses trabalhos foram verificados individualmente, e aqueles considerados fora do escopo temático foram removidos.

A análise de “co-citação” revelou insights valiosos sobre a interconexão dos trabalhos nos quatro clusters identificados, que envolveu um conjunto de 31 estudos. Esses estudos guiaram os

núcleos temáticos ao longo dos últimos 20 anos, por se tornarem mais influentes nas principais abordagens sobre a simulação hidrológica no cárste.

Além disso, a análise de “acoplamento bibliográfico” avaliou a literatura mais recentes (últimos 5 anos). Nessa análise, onze clusters foram gerados, agrupando um total de 131 trabalhos publicados entre os anos de 2016 e 2020. Esses clusters fornecem um panorama atualizado que permite compreender as tendências e avanços nesse campo específico.

O aumento no número de pesquisas e citações nos últimos cinco anos representou um crescimento significativo na produção científica na temática (Figura 3). Essa tendência indica uma ampliação do interesse e do reconhecimento da importância dos estudos sobre sistemas cársticos no meio científico e sua compreensão.

O mapa de calor gerado (Figura 4) revela visualmente a distribuição das principais pesquisas por núcleo temático, fornecendo uma visão abrangente das áreas de pesquisa mais proeminentes dentro do campo científico em análise.

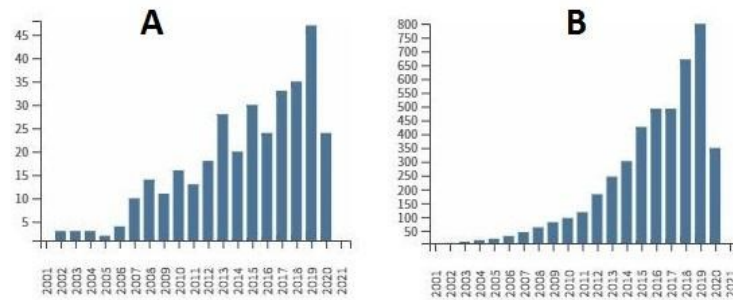


Figura 3: A) Itens publicados anualmente, B) Número de citações anuais. Fonte: Autores.

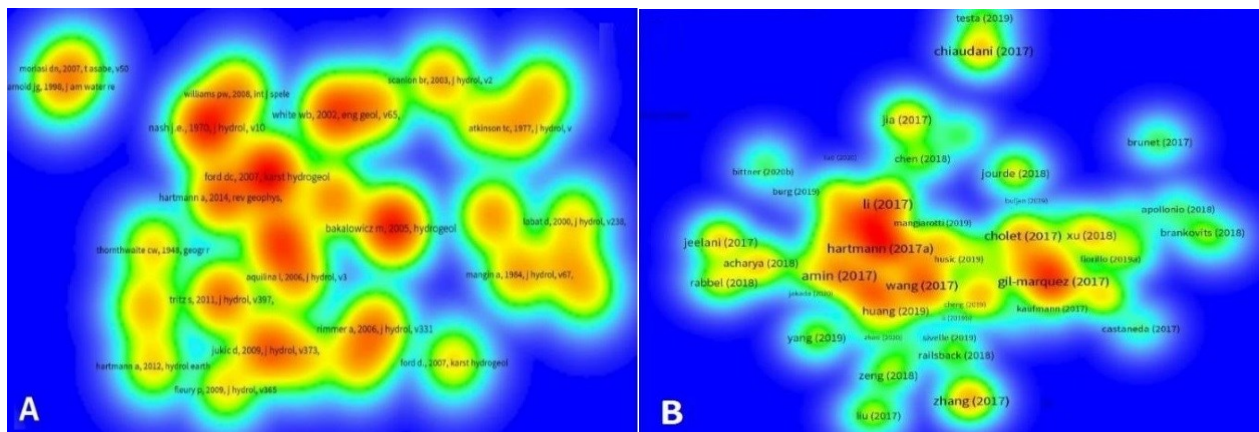


Figura 4: Agrupamentos dos trabalhos encontrados pela análise de “co-citação” (A) e análise de “acoplamento bibliográfico” (B). Fonte: Autores.

Modelagem Hidrológica em Sistema Cársticos.

As pesquisas agrupadas em eixos temáticos forneceram um panorama abrangente dos desafios e dificuldades enfrentados no

monitoramento e na modelagem da dinâmica hídrica e sedimentológica em sistemas cársticos. Essa convergência temática reforça a importância desses estudos na compreensão desses ambientes complexos e na busca por soluções eficazes para enfrentar os desafios postos.

No contexto dos métodos de avaliação da dinâmica hidrológica, os trabalhos que utilizaram traçadores naturais e artificiais emergiram como uma abordagem amplamente explorada e discutida.

Entre os autores mais citados, destaca-se o trabalho de Kovács e Sauter (2006), cuja contribuição se estendeu ao discutir o uso desses traçadores naturais e artificiais em diversas aplicações. Os autores abordaram aspectos cruciais, como a determinação da velocidade e trajetórias da água, a identificação de conexões subterrâneas, a delimitação de áreas de recarga, a caracterização das propriedades geométricas do sistema, o estudo do transporte de contaminantes e o mapeamento do deslocamento até áreas de descarga.

Essas abordagens metodológicas têm sido essenciais para avançar na compreensão dos processos hidrológicos peculiares aos sistemas cársticos, oferecendo insights valiosos para a gestão mais sustentável dos recursos hídricos, a prevenção de riscos e o planejamento adequado do uso do solo, fornecendo subsídios para a tomada de decisão embasada em evidências e para a implementação de medidas efetivas de preservação desse ecossistema frágil.

No Brasil, Ferrari e Karmann (2008) conduziram um importante pesquisa na região do Vale do Ribeira, em São Paulo, onde avaliaram registros de precipitação e hidrogramas de nascentes utilizando traçadores químicos em um aquífero cárstico. Segundo os autores, a utilização desses traçadores permitiu a medição da geometria e da dinâmica do fluxo subterrâneo em pontos específicos, o que possibilitou a caracterização de redes, a estimativa de diâmetros e volumes, bem como a determinação das taxas de fluxo em condutos inacessíveis.

De maneira geral, as pesquisas envolvendo o uso de traçadores tiveram como objetivo fornecer dados para abastecer modelos locais ou regionalizados. Spruill et al. (2000), por exemplo, conduziram ensaios com traçadores a fim de simular as descargas diárias e mensais, visando a calibração do modelo SWAT (Ferramenta de Avaliação do Solo e Água), em uma bacia cárstica em Kentucky, Estados Unidos.

Recentemente, Jakada et al. (2020) investigaram as vias preferenciais de recarga

autogênica em uma bacia cárstica em Miaogou, China, utilizando traçadores artificiais. Os resultados dos traçadores auxiliaram na análise da relação entre a precipitação efetiva e o escoamento dentro do SWAT, obtendo forte correlação com os valores observados, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,80 e um índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,72.

Além do uso de traçadores, é importante destacar que estudos que propuseram modificações na parametrização de modelos de simulação hidrológica convencional, como o SWAT, têm ganhado destaque nas últimas duas décadas. Essas modificações visam principalmente melhorar a integração entre as fases de superfície do ciclo hidrológico e as águas subterrâneas.

Os estudos têm contribuído para aprimorar a capacidade dos modelos hidrológicos em simular com maior precisão os processos hidrogeológicos. Ao considerar os efeitos do carste e sua influência na dinâmica hídrica, essas modificações paramétricas têm proporcionado uma representação mais realistas dos fluxos de água e um melhor entendimento dos processos hidrológicos complexos em bacias cársticas (Long e Putnam, 2004; Aquilina et al., 2006).

Baffaut e Benson (2008) realizaram uma ampliação da parametrização dos fluxos rápidos no modelo SWAT (SWAT-B&B) em uma bacia cárstica em Missouri, Estados Unidos. Essa ampliação incorporou elementos como a entrada de sumidouros, ressurgências e fluxos de retorno. Para integrar a infiltração rápida ao aquífero profundo, foi adotado o método de dois reservatórios de Maillet, que considerou a inclusão de condutos e fissuras nos reservatórios por meio do algoritmo de roteamento de aquíferos (SSRA - Subsurface Routing Algorithm) e do fluxo em orifícios.

No método de Maillet a interação entre dois reservatórios é simulada através de parâmetros hidrológicos, como a taxa de infiltração, a taxa de escoamento superficial e a taxa de recarga do aquífero. No SSRA o fluxo em condutos e fissuras é representado por algoritmos que roteiam a água subterrânea de acordo com a topografia do terreno, a conectividade dos condutos e as características hidráulicas dos aquíferos. Esses algoritmos consideram a diferença de pressão hidráulica entre os pontos de entrada e saída dos condutos, bem como os gradientes hidráulicos ao longo do caminho do fluxo subterrâneo.

Quanto ao método de fluxos em orifícios, são consideradas as formações cársticas que atuam como abertura para os fluxos de água, como dolinas, sumidouros e ressurgências. Esse método

foi adotado por Yachtao (2009), que simulou as descargas de nitrogênio provenientes de sumidouros na bacia cárstica de Opequon Creek, Estados Unidos, na escala de unidades de resposta hidrológica (URH).

Tzoraki e Nikolaidis (2007) desenvolveram o modelo K-SWAT, uma versão adaptada por meio de ensaios que avaliaram a variação temporal dos fluxos subterrâneos e superficiais das concentrações de nitrato na bacia cárstica do rio Koiliaris, Grécia. Posteriormente, Kourgialas et al. (2010) e Nikolaidis et al. (2013) incorporaram refinamentos e ajustes para melhor adequar o modelo. O K-SWAT (Figura 5) inclui a consideração de caminhos preferenciais de fluxo, como condutos e fissuras, leva em conta a variação temporal das concentrações de substâncias, utiliza parametrização específica sobre a permeabilidade do solo, as características das formações rochosas e a interação entre as águas superficiais e subterrâneas, além de implementar melhorias nas rotas de escoamento.

No entanto, resultados obtidos por Palanisamy e Workman (2015) ao utilizar o K-SWAT na bacia cárstica de Cane Run Creek, Kentucky, Estados Unidos, indicam que as alterações nos fluxos e nas rotas preferenciais influenciaram a eficiência do modelo na previsão dos picos de fluxo superficial em relação à resposta dos condutos subterrâneos. Esses achados destacam a importância de considerar a

complexidade das interações hidrológicas no cárste, visto que suas dinâmicas específicas limitam o desenvolvimento de modelos globais.

Uma adaptação adicional do K-SWAT foi proposta por Malago et al. (2016) em estudo na bacia cárstica da ilha de Creta, Grécia. Os autores desenvolveram uma abordagem que combinou a parametrização do modelo SWAT-B&B (Baffaut e Benson, 2008) e novas variáveis para fluxos subterrâneos. A combinação dos parâmetros levou em conta também as reformulações propostas por Easton et al. (2008), que desenvolvia a versão do SWAT-VSA (Soil and Water Assessment Tool - Variable Source Areas), uma modificação no código do SWAT que permite considerar diferentes origens de recarga, por meio do índice de umidade topográfica, o qual classifica as URH em classes de umidade.

As classes de umidade estão associadas ao armazenamento efetivo de água no sistema, refletindo as variações na capacidade de retenção de água do solo em diferentes áreas da bacia. Além disso, considera a dinâmica dos nutrientes, a qual varia de acordo com o uso da terra. Essas variações são incorporadas no modelo para representar as diferentes fontes e taxas de transporte de nutrientes nos processos hidrológicos. Essa abordagem permite uma melhor caracterização dos ciclos de nutrientes, sendo particularmente relevante para avaliar a qualidade da água e os impactos da agricultura.

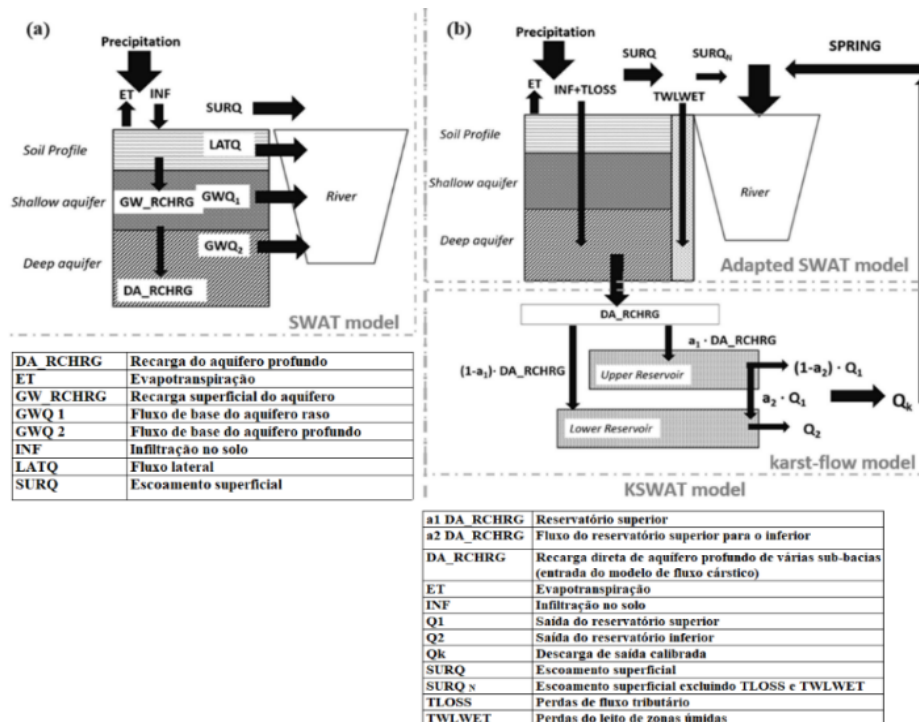


Figura 5: Parâmetros de entrada do Modelo K-SWAT. Fonte: Adaptado de Malago et al. (2016).

Em estudo realizado na bacia cárstica de Spring Creek, Pensilvânia, Estados Unidos, Amin et al. (2017) usaram o SWAT-VSA para avaliar o fluxo de nutrientes e a carga de sedimentos em uma região dominado por pastagens degradadas. Os resultados demonstraram que o SWAT-VSA obteve uma acurácia global maior em comparação com a aplicação do SWAT convencional, em relação a vazão diária (NSE = 0,73), os níveis de nutrientes (N e P) e a carga sedimentar (NSE = 0,68).

Além disso, no contexto de integrar melhor os processos hidrológicos entre a superfície e o aquífero, Sophocleous et al. (2000) propuseram a combinação do modelo SWAT com o Modelo Hidrogeológico de Fluxo Modular por Diferenças Finitas (MODFLOW). Enquanto o MODFLOW interpreta a água subterrânea em grades regulares, operando em escalas de tempo maiores com baixas velocidades de fluxo, o SWAT utiliza a discretização espacial através de URH (células irregulares) com escalas de tempo menores. As modificações realizadas nos códigos dos modelos visaram normalizar a transferência de informações entre eles, permitindo uma melhor integração dos processos hidrológicos em diferentes escalas espaciais e temporais (Sophocleous et al., 2000).

O SWATMOD (Figura 6) é a versão integrada dos modelos, e substitui a simplificação da simulação subterrânea do SWAT pelo simulador de água subterrânea do MODFLOW. No entanto, o modelo não representava a zona vadosa

intermediária, simulando o ciclo superficial no SWAT até a zona de raízes, e interpretada no MODFLOW a distribuição regular no aquífero (Araujo, 2018).

Bailey et al. (2016) desenvolveram o SWATMOD-Prep, uma interface projetada para auxiliar na preparação dos arquivos que serão integrados. Park et al. (2019) ampliaram a funcionalidade do SWAT MOD-Prep adicionando uma interface gráfica de código aberto chamada Q-SWATMOD, o que torna a interação com os módulos do modelo mais acessível e intuitiva, simplificando o fluxo de informações entre eles.

A versão SWAT+ sugerida por Bieger et al. (2017) é uma outra opção de integração dos módulos de superfície e subterrâneos. O código modificado permite que as URH sejam divididas em uma ou mais unidades de paisagem, o que permite representar fácies cársticas de forma mais detalhada, como áreas de várzeas e topos de morro. Os reservatórios, lagos, aquíferos e áreas de recarga são designados como objetos espaciais separados.

É evidente que os modelos convencionais modificados ou adaptados não possuem uma aplicação global, sendo necessária a calibração dos parâmetros de forma particular em cada bacia hidrográfica (Arnold et al., 2018). Portanto, para garantir a representatividade dos resultados das simulações, é fundamental contar com uma base de dados de monitoramento robusta, capaz de fornecer informações precisas e abrangentes.

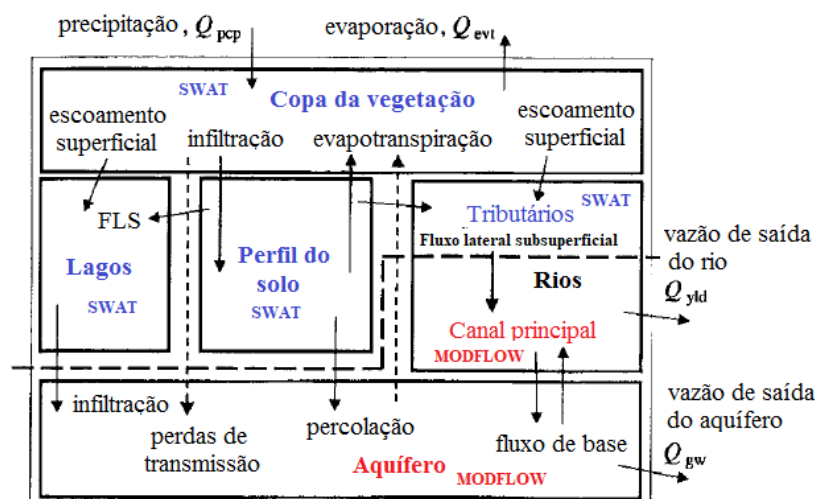


Figura 6: Variáveis do modelo integrado SWATMOD. Fonte: Araujo (2018).

O Modelo Hidrológico para Ambiente Cárstico (HYMKE) foi desenvolvido com o objetivo de analisar a dinâmica hidrológica da formação cárstica da Montanha Hermon, em Israel

(Rimme e Lechinsjy, 2006). Utilizando séries temporais de dados como precipitação, evaporação potencial (calculada pelo algoritmo de Penman-Monteith) e níveis de água subterrânea (obtidos por

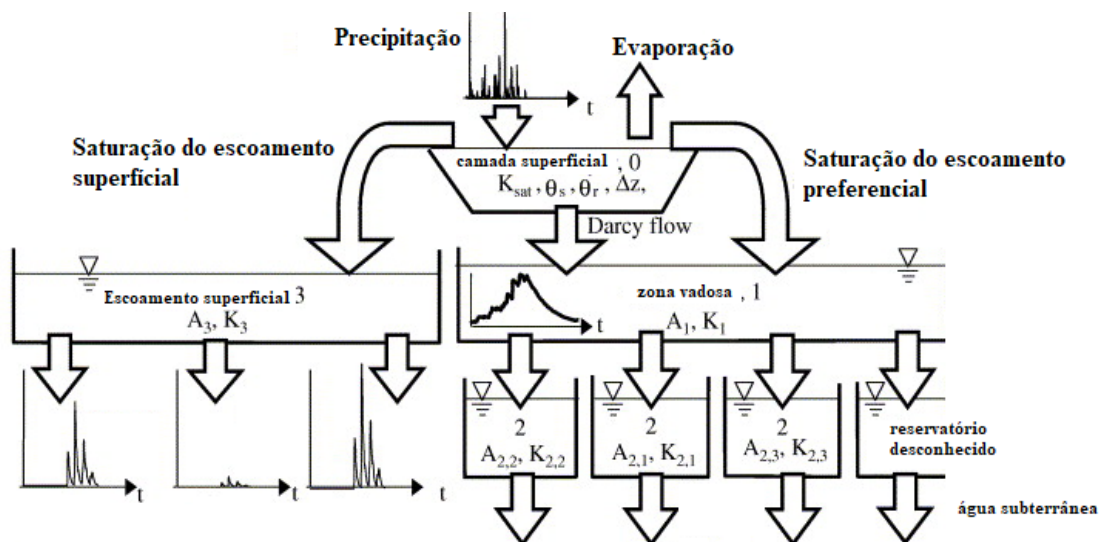
meio de poços), o HYMKE permite simular as diferentes contribuições entre os fluxos superficiais e de base. Essa distinção é realizada por meio da técnica de "recursive digital filter", que utiliza informações de fluxos preferenciais (como fissuras, cavernas e dolinas) para determinar as contribuições do fluxo de recarga subterrânea.

No HYMKE, a superfície terrestre (módulo 0) é recarregada pela precipitação e sofre perda de água por evaporação, escoamento superficial e percolação para camadas mais profundas. A saturação da camada superficial resulta em escoamento superficial (módulo 3) e fluxo preferencial descendente, que é direcionado para a camada de baixa e alta permeabilidade (epicarste) (Jeannin et al., 2021). A percolação na zona vadosa (módulo 1) inclui fluxo lento de Darcy (dependente do teor de umidade do solo e da condutividade hidráulica) e fluxo rápido associado a eventos de cheia, que alimentam os reservatórios (módulo 2).

A camada superficial (0) é caracterizada pelos parâmetros de condutividade hidráulica (KD

θ), profundidade do solo (ΔZ) e teores de umidade saturada (θ_R) e residual (θ_S). A zona vadosa (1) é caracterizada pelo coeficiente de armazenamento constante linear (K_1) e a área (A_1). Os reservatórios (2) são caracterizados pelos coeficientes de armazenamento (K_{2k}), áreas contribuintes (A_{2k}) e o fluxo base, que é desconhecido. Os fluxos de escoamento superficial (3) são representados pelos coeficientes de K_3 e A_{3k} (Figura 7).

Rimmer e Lechinsjy (2006) encontraram correlação satisfatória entre os resultados obtidos para fluxos superficiais ($r^2 = 0,60$) e fluxos de base ($r^2 = 0,77$) em três afluentes da bacia do rio Jordão. Desde então, o modelo tem sido adaptado para ser aplicado em outras regiões cársticas (Samuels et al., 2010; Hartmann et al., 2014; Yona et al., 2020), demonstrando sua capacidade de ser utilizado em diferentes contextos e fornecer insights relevantes sobre os processos hidrológicos em bacias cársticas.



0: camada superficial, 1: zona vadosa, 2: água subterrânea com seus quatro reservatórios, 3: escoamento de superfície.

Figura 7: Diagrama do modelo HYMNE. Fonte: Adaptado de Rimmer and Lechinsjy (2006).

Mazzilli et al. (2019) propuseram o desenvolvimento de uma plataforma de modelagem ajustável chamada KARSTMOD, projetada para reproduzir a estrutura de modelos concentrados de sistemas cársticos descritos na literatura. Essa plataforma permite a ativação ou desativação de módulos específicos e inclui quatro reservatórios conceituais possíveis: epicarste (E), condutos (C), matriz (M) e reservatório baixo (L), que representa um sistema mais profundo com dinâmica mais lenta. Além disso, o modelo apresenta equações de descarga, análise de

sensibilidade e estimativa de incerteza, aumentando sua flexibilidade e robustez.

A aplicação do KARSTMOD foi realizada por Duran et al. (2020), com o objetivo de prever a descarga líquida em uma bacia cárstica na Normandia, França. De acordo com os autores o modelo foi capaz de reproduzir de forma satisfatória a dinâmica das trocas entre condutos e aquíferos. Esse modelo tem sido testado recentemente em bacias cársticas pelo mundo (Baudement et al., 2017; Johannet et al., 2015; Loncar et al., 2018; Poulain et al., 2018).

O Modelo Conceitual Integrado de Simulação Hidrológica (MIKE SHE) é outro algoritmo de simulação que possibilita a integração das dinâmicas hidrológicas do carste em seu código. Desenvolvido pelo Instituto Hidráulico Dinamarquês (DHI, 2007), o modelo permite a inserção das variáveis de infiltração difusa e concentrada, recarga autógena e halógena, fluxo subterrâneo rápido e lento, entre outras.

No MIKE SHE, as áreas de recarga são subdivididas verticalmente em três compartimentos principais: (A) atmosfera, onde os processos climáticos são extrapolados para a bacia e a evapotranspiração de referência é calculada utilizando o método de Penman-Monteith; (ZI) zona insaturada, onde a força motriz do fluxo vertical é completamente devido à gravidade e é dividida em uma camada superior (solos e epicarste) e uma camada inferior (matriz rochosa

não saturada); (ZS) zona saturada, que é dividida em três camadas (matrizes) baseadas na equação de Darcy, sendo que uma das matrizes representa a simulação dos condutos (Figura 8).

Benischke et al. (2010) realizaram ajustes no modelo MIKE SHE para identificar limites de recarga e caminhos de fluxo subterrâneo na região cárstica da cordilheira Kaisergebirge, Áustria. Os resultados da verificação mostraram que o modelo foi capaz de simular de forma satisfatória a evolução temporal da descarga (NSE = 0,82) e o balanço hídrico geral. Doummar et al. (2012) usaram o MIKE SHE na bacia cárstica de Gallusquelle, Alemanha, simulando a variabilidade temporal e espacial da recarga e descarga no sistema. Janza (2010) também conseguiu resultados satisfatórios na simulação processos hidrológicos da bacia cárstica de Rizana, Eslovênia.

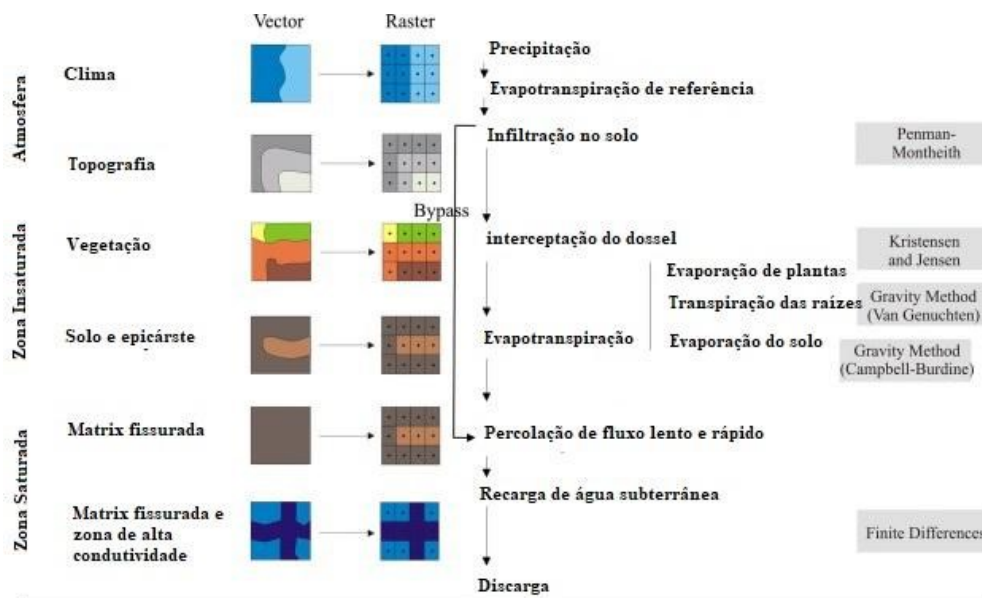


Figura 8: Fluxograma do modelo MIKE SHE. Fonte: Adaptado de DHI (2007) e Doummar et al. (2012).

A produção de sedimentos no cárste de superfície.

Em uma bacia cárstica os processos responsáveis por esculpir os vazios formados pela dissolução da rocha carbonática criam condições favoráveis para o acúmulo e preservação de sedimentos, protegendo-os dos efeitos dos processos intempéricos superficiais (Travassos, 2019). Essa combinação de materiais sedimentares e rochas carbonáticas resulta na formação de rochas clásticas e sedimentos, comumente classificados de acordo com o tamanho de seus grãos, como cascalho, conglomerado, areia, arenito, silte, siltito, lama, folhelho, argila e argilito.

Através do estudo do tipo de material depositado, é possível inferir a intensidade da corrente de fluxo durante a formação do depósito sedimentar. Os sedimentos encontrados podem variar desde fragmentos de rochas insolúveis e clastos resultantes do colapso de tetos e galerias, até sedimentos fluviais provenientes de sumidouros, inundações de fluxos adjacentes, fraturas no epicarste e colapsos de dolinas (Laureano e Karmann, 2013).

Os sedimentos detríticos também podem se originar de diferentes fontes, como sedimentos aluviais (A), lamas lacustres ou epifreáticas (B), resíduos insolúveis (C), sólidos suspensos na água (D) e depósitos orgânicos (E) (Figura 8). As zonas

de deposição ocorrem em fraturas alargadas no epicárste (I), abismos (II), sumidouros (III), colapsos internos (IV), redes de galerias inundadas (V) e retro-inundação (VI).

Para avaliar a contribuição dos processos superficiais de erosão e transporte de sedimentos em direção às cavernas, modelos baseados em análises multicritério, como o Projeto de Previsão de Erosão Hídrica (WEPP) (Flanagan e Nearing, 2007), a Equação Universal de Perda de Solo (USLE) (Wischmeier e Smith, 1978), ou o Método de Erosão Potencial (EPM) (Gavrilovic, 1988), entre outros, são alternativas viáveis usadas para indicar áreas mais vulneráveis as perdas de solo, especialmente em áreas com poucos registros disponíveis.

Nessa abordagem a obtenção das variáveis relacionadas à produção e transporte de sedimentos pode ser realizada por meio de uma ampla gama de ferramentas e técnicas. O uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permite a análise espacial e a integração de diferentes camadas de informação, como dados topográficos, de uso da terra, solos e precipitação, fornecendo uma visão abrangente das características da bacia hidrográfica. O sensoriamento remoto desempenha um papel crucial ao fornecer imagens de satélite e dados de sensoriamento remoto que podem ser processados e analisados para extrair informações sobre a cobertura do solo, relevo e outros parâmetros relevantes para a erosão e transporte de sedimentos (Xu et al., 2023).

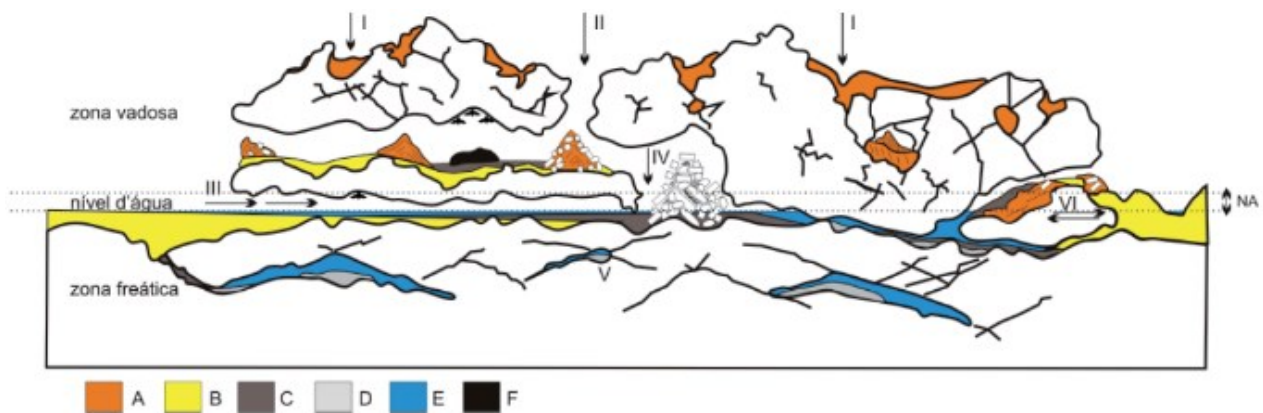


Figura 9: Cenários possíveis de deposição em feições do carste e suas fontes (Laureano, Karmann, 2013).

Para avaliar a erosão hídrica em bacias hidrográficas, a equação universal revisada de perda de solo (RUSLE) (Renard et al., 1997) é amplamente reconhecida no mundo (Feng et al., 2016). O modelo permite identificar áreas com maior vulnerabilidade à erosão em diferentes cenários de uso da terra. Essas áreas quando associadas a feições cársticas, como sumidouros, dolinas, cânions, que desempenham o papel de interconexão entre as águas superficiais e subterrâneas, são ainda mais sensíveis e normalmente transportam grandes quantidades de sedimentos (Panagos et al., 2015).

De forma resumida, a RUSLE é expressa pela equação: $A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$, onde a perda de solo média anual (A) é medida em $Mg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$, a erosividade da chuva (R) em $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}\ ano^{-1}$, a erodibilidade do solo (K) em $Mg\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$. Já a topografia (LS), a cobertura do solo (C) e as práticas de manejo (P), como valores adimensionais.

A erosividade da chuva (R) é calculada a partir do Índice de Erosão (EI30), que é o produto da energia cinética da chuva (Ec) pela intensidade

máxima em trinta minutos (I30). A Ec ($MJ\ ha^{-1}\ mm^{-1}$) é determinada pela equação: $Ec = 0,119 + 0,0873\ \log\ I$, onde I representa a intensidade da chuva em $mm\ h^{-1}$. O EI30 ($MJ\ ha^{-1}\ mm^{-1}$) é calculado de acordo com a equação: $EI30 = Ec \times I30$, sendo I30 a intensidade máxima em 30 minutos em $mm\ h^{-1}$ (Bertoni e Lombardi Neto, 2018). Por meio de registros pluviométricos em estações de monitoramento, é possível interpolar as informações obtidas em ensaios locais para obter o valor médio do EI30. Essa média dos valores de R possibilita a avaliação de bacias hidrográficas em diferentes cenários (Olivetti et al., 2015).

A erodibilidade do solo (K) está associada às propriedades morfológicas, mineralógicas, físicas, químicas e biológicas do solo (Denardin, 1990). Para determinar esse fator são instaladas parcelas experimentais de comprimento padrão (22,3 m) ao longo de um declive específico (9%), expondo o solo à ação da chuva natural (Marques et al., 1997; Silva et al., 1999). No entanto, esse método é considerado dispendioso, e para avaliações em escala de bacia hidrográfica é necessário formular cenários aproximados devido

aos custos de implementação de parcelas em larga escala (Godoi et al., 2021).

Recentemente, Godoi et al. (2021) simularam os valores de K para os solos no Brasil com base nos estudos em parcelas experimentais distribuídos pelo território. Os valores encontrados variaram entre 0,0002 e 0,0636 ($Mg\ h^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$), refletindo a ampla heterogeneidade da erodibilidade no país.

A topografia (LS) é um fator ponderado pelo comprimento de rampa (L) em um determinado declive (S) (Yang, 2015). À medida que o produto LS aumenta as perdas de solo são intensificadas devido ao aumento da velocidade do escoamento de água pela enxurrada (Oliveira et al., 2013).

Com os avanços das técnicas e ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, tem sido possível superar as limitações dos modelos empíricos na determinação do fator LS. Modelos semi-empíricos e conceituais, como a LS-RUSLE 3D (*Revised Universal Soil Loss Equation - 3D*) (Renard et al., 1997) e LSUSPED (*Unit Stream Power-based Erosion Deposition*) (Mitasova et al., 2001) foram desenvolvidos para melhor representar a relação entre topografia e perda de solo.

Os modelos digitais de elevação permitem obter valores de topografia substituindo o comprimento da rampa pela área de contribuição a montante para cada pixel, o que permite a estimativa dos fluxos de direção e acumulação do escoamento superficial na bacia (Oliveira, 2011).

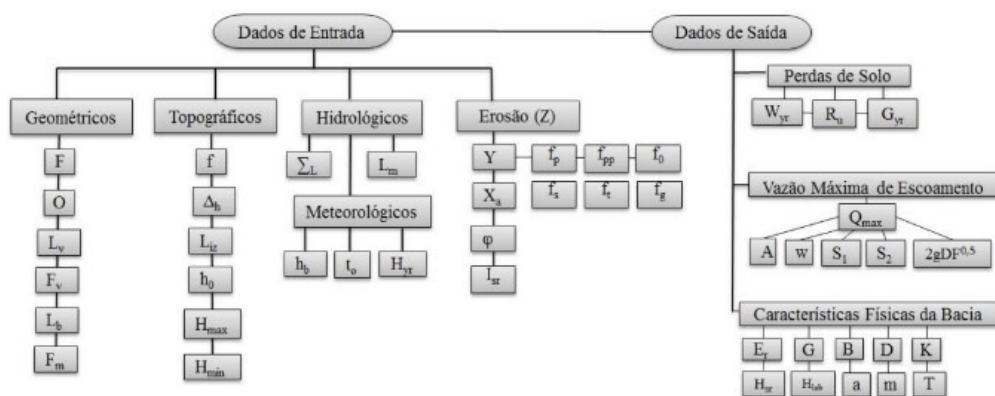
A cobertura do solo (C) e as práticas manejo adotadas (P) são fatores que representam a

influência de atividades humanas. O fator C é a combinação da razão da perda de solo (RPS) e a fração do índice de erosividade anual (FEI30) associada ao ciclo da cultura (Wischmeier & Smith, 1978).

A RPS expressa a proporção das perdas de solo observadas em um determinado sistema de manejo em relação às perdas ocorridas em um solo sem cobertura vegetal, variando de 0 a 1. Já a FEI30 é uma medida que representa a porcentagem do índice de erosividade que contribuiu para a erosão considerada no cálculo da respectiva RPS, variando 0 a 1. Logo, o fator C aproxima-se de 0 quando ocorre boa cobertura vegetal e de 1 em áreas sem cobertura (Bertol et al., 2001).

Por fim, o fator P varia de acordo com a adoção ou não de práticas de conservação do solo, como o plantio em nível, em faixas de contorno, terraceamento, plantio direto, variando de 0 a 1.

Além da RUSLE uma gama de métodos de simulação da erosão pode ser encontrada na literatura. Gavrilovic (1988), por exemplo, realizou estudos exploratórios e desenvolveu tabelas com índices que representam fatores ambientais, (Figura 10). O Método de Erosão Potencial (EPM) tem sido utilizado com frequência em regiões cársticas da Europa, Oriente Médio e norte da África (Kouhpeima et al., 2011; Bozorgzadeh; Kamani, 2012; Barovic e Spalevic, 2015; Dragicevic et al., 2016). No entanto, a aplicação dessas tabelas em regiões de clima tropical requer adaptação conceitual, especialmente ao correlacionar as características dos solos, cobertura vegetal e regime de chuva (Kouhpeima et al., 2011).



Dados de Entrada									
Geométricos		Topográficos		Hidroológico		Erosão (Z)			
F	Área da bacia	f	Área entre curvas de nível	ΣL_1	Comprimento dos cursos d'água de I e II ordem	Y	Resistência do solo a erosão	f_p	Boa permeabilidade
O	Comprimento da bacia	Δh_0	Equidistância entre curvas de nível	L_m	Menor distância entre a montante e a jusante	I_{sr}	Inclinação média da bacia	f_{pp}	Média permeabilidade
L_p	Comprimento do rio principal	L_{12}	Comprimento das curvas de nível	Meteorológico		ϕ	Grau da erosão no terreno	f_0	Pouca permeabilidade
F_v	Maior área da bacia	h_0	Menor altitude da curva de nível	h_p	Média do volume de chuvas intensas (24 horas)	X_s	Uso e manejo do solo	f_1	Boa cobertura vegetal
L_p	Largura da bacia	H_{max}	Maior altitude	t_0	Temperatura média do ar			f_1	Média cobertura vegetal
F_m	Menor área da bacia	H_{min}	Menor altitude	H_{50}	Precipitação média			f_2	Pouca cobertura vegetal
Dados de Saída									
S_1	Permeabilidade do solo	E_r	Energia da erosão	K	Sinuosidade do rio	Z	Intensidade da erosão		
S_2	Índice de Cobertura Vegetal	H_{ob}	Altura da erosão no relevo	m	Desenvolvimento da bacia	R_p	Retenção de sedimentos		
A	Forma da bacia	G	Densidade da drenagem	a	Simetria do rio	Q_{max}	Vazão máxima de escoamento		
w	Percolação de água	B	Largura média da bacia	D	Diferença de elevação	W_{3T}	Produção total de sedimentos		
$2gDF^{14}$	Energia cinética da chuva	H_{sr}	Altitude média da bacia	T	Coefficiente de temperatura	G_{sr}	Perda média de solo		

Figura 10: Parâmetros de entrada e dados de saída do programa EPM / IntErO. Fonte: Tavares (2017) adaptado de Spalevic (2011).

Conforme discutido até aqui, as técnicas desenvolvidas para cenários cársticos específicos desempenham um papel crucial na busca pela consistência dos modelos hidrológicos globais. No entanto, é imprescindível contar com uma base de dados sólida para alimentar esses modelos, principalmente devido à significativa variação na recarga e nas nascentes cársticas. O monitoramento hidrológico em áreas cársticas, no entanto, é uma tarefa complexa e dispendiosa, exigindo esforços consideráveis na coleta de dados de vazão de superfície e subterrânea, especialmente durante períodos cheias.

Além dos desafios operacionais, a escassez de recursos materiais também se apresenta como um obstáculo significativo. Consequentemente, a falta de séries históricas de monitoramento em regiões cársticas representa um fator limitante para a aplicação de modelos mais robustos e avançados (Goldscheider e Drew, 2007). Essa limitação enfatiza a necessidade premente de investimentos e esforços contínuos para aprimorar a disponibilidade e a qualidade dos dados hidrológicos em áreas cársticas, a fim de possibilitar avanços significativos no desenvolvimento e na aplicação desses modelos mais robustos.

Conclusão

A busca por pesquisas relevantes sobre a temática da modelagem hidrológica em sistemas cársticos resultou em uma ampla seleção de trabalhos que passaram por um processo rigoroso de triagem. As análises de co-citação e acoplamento bibliográfico proporcionaram insights significativos, destacando trabalhos-chave e revelando as interconexões temáticas ao longo de

20 anos, e os desenvolvimentos mais recentes nos últimos 5 anos. Essas análises fornecem uma base sólida de pesquisas que podem ser consultadas em futuras investigações e aprofundamento dentro desse campo de estudo.

Em resumo, a aplicação de métodos hidráulicos, geofísicos, geológicos e traçadores naturais e artificiais se mostraram essencial para a caracterização e avaliação precisa dos processos hidrossedimentológicos no cárste. Foi evidente o notável avanço metodológico com o surgimento de técnicas e ferramentas computacionais, além do esforço amostral no monitoramento, que permitiu a obtenção de parâmetros mais confiáveis para a simulação dos modelos.

Logo, o acoplamento de modelos superficiais e subterrâneos foram se aprimorando, resultando na melhoria das previsões da dinâmica hidrológica no cárste. Assim, o contínuo desenvolvimento e refinamento das metodologias são cruciais para avançar na compreensão desse complexo sistema.

As informações sobre a temática da modelagem hidrológica nesse estudo servem como base para futuras pesquisas e avanços no campo, pois oferecem a orientação sobre o desenvolvimento e pesquisas atuais, e auxilia na promoção de melhores práticas de gestão sustentável em bacias cársticas.

Agradecimentos

Este estudo faz parte do projeto 'Susceptibilidade hidrológica e geomorfológica das cabeceiras do Rio Vermelho' nº 01/2018 e da UNESCO International Sediment Initiative- ISI/LAC. Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro da CAPES-Brasil.

Referências

- Aquilina, L., Ladouche, B., Doerfliger, N. 2016. Water storage and transfer in the epikarst of karstic systems during high flow periods, *J. Hydrol.*, 327, 472-485. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.11.054>.
- Amin, M.G. M., Veith, T.L., Collick, A.S., Karsten, H.D., Buda, A.R. 2017. Simulating hydrological and nonpoint source pollution processes in a karst water-shed: a variable source area hydrology model evaluation. *Agric. Water Manag.*, 180, 212-223. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.011>
- Araújo, D. L. Avaliação dos impactos da exploração de águas subterrâneas na bacia do ribeirão rodeador por meio de simulação integrada entre os modelos SWAT e MODFLOW. 2018. Dissertação de Mestrado. Tecnologia ambiental e recursos hídricos. Universidade de Brasília, Brasília-DF, 165.
- Arnold, J.G., Arnold, K., Bieger, M.J., White, R., Srinivasan, J.A., Dunbar, P.M., Allen. 2018. Use of decision tables to simulate management in SWAT+, *Water*, 10, 6, 713. <https://doi.org/10.3390/w10060713>
- Baffaut, C., Benson, V.W. 2008. Modeling flow and pollutant transport in a karst watershed with SWAT. *Trans. ASABE*, 52, 2, 469-479. <https://doi.org/10.13031/2013.26840>
- Betrie, G. D., Mohamed, Y. A., Van Griensven, A., Srinivasan R. 2011. Sediment management modeling in the Blue Nile Basin using SWAT model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 807-818. <https://doi.org/10.5194/hess-15-807-2011>
- Bertol, I., Schick, J., Batistela, O. 2001. Razão de Perdas de Solo e Fator C para as Culturas de Soja e Trigo em Três Sistemas de Preparo em um Cambissolo Húmico Alumínico. *R. Bras. Ci. Solo*, 25, 451-461. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000200021>
- Bertoni, J., Lombardi Neto, F. 2018. Conservação do Solo. 8. ed. São Paulo: Ícone. 360.
- Bailey, R.T., Wible, T.C., Arabi, M. E Ditty, J. 2016. Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW. *Hydrological Processes*. 30, 23, 1-14. <https://doi.org/10.1002/hyp.10933>
- Ballesteros, D., Farrant, A., Sahy, D., Genuite, K., Bejarano, I., Nehme, C. 2023. Going with the flow: Sedimentary processes along karst conduits within Chalk aquifers, northern France, *Sedimentary Geology*, 452, 106422. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2023.106422>.
- Bao, J., Wu, X., Zhang, Q., Yuan, D., Guo, F., Liu, F. 2023. Unveiling the nitrogen transport and transformation in different karst aquifers media, *Journal of Hydrology*, 620, 129335. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129335>.
- Baudement, C., Arfib, B., Mazzilli, N., Jouves, J., Lamarque, T., Guglielmi, Y. 2017. Groundwater management of a highly dynamic karst by assessing baseflow and quickflow with a rainfall-discharge model (Dardennes springs, SE France). *Bull. la Société géologique Fr.*, 188, 40, 1-20. <https://doi.org/10.1051/bsgf/2017203>.
- Barovic, G., Spalevic, V. 2015. Calculation of Runoff and Soil Erosion Intensity in the Rakljanska Rijeka Watershed, Polimlje, Montenegro. *Agriculture & Forestry, Podgorica*, 61, 4, 109 -115. <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.61.4.11>
- Benischke, R., Harum, T., Reszler, C., Saccon, P., Ortner, G., Ruch, C. 2010. Abgrenzung hydrographischer Einzugsgebiete durch Kombination hydrogeologischer Untersuchungen mit Isotopenmethoden und hydrologischer Modellierung. *Grundwasser: Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie*, 15, 43-57. <https://doi.org/10.1007/s00767-009-0124-y>.
- Bieger, K., Bieger, J.G., Arnold, H., Rathjens, M.J., White, D.D., Bosch, P.M., Allen, M., Volk, R., Srinivasan. 2017. Introduction to SWAT+, a completely restructured version of the soil and water assessment tool. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 53, 1, 115-130. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12482>.
- Bozorgzadeh, E., Kamani, N. 2012. A Geographic Information System (GIS) - based modified Erosion Potential Method (EPM) Model for Evaluation of Sediment Production. *Journal of Geology and Mining Research, Nairobi*, 4, 6, 130 -141. <https://doi.org/10.5897/JGMR11.029>.
- Bresinsky, L., Kordilla, J., Engelhardt, I., Livshitz, Y., Sauter, M. 2023. Variably saturated dual-permeability flow modeling to assess distributed infiltration and vadose storage dynamics of a karst aquifer – The Western Mountain Aquifer in Israel and the West Bank, *Journal of Hydrology*, 18, 100143. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2022.100143>.
- Cheng, S., Xingxiu, Y., Zhenwei, L., Xianli, X., Huayi, G., Zongda, Y. 2023. The effect of climate and vegetation variation on monthly sediment load in a karst watershed, *Journal of*

- Cleaner Production, 382, 135290, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135290>.
- Denardin, J. E. Erodibilidade do Solo Estimada por meio de Parâmetros Físicos e Químicos. 1990. Tese de Doutorado em Agronomia, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-USP, Piracicaba, 113.
- DHI, Danish Hydraulic Institute Water and Environment. 2007. MIKE SHE – User Manual. Denmark Hydrology Institute. Hørsholm, Denmark. 1-2.
- Doummar, J., Sauter, M., Geyer, T. 2012. Simulation of flow processes in a large scale karst system with an integrated catchment model (Mike She) – Identification of relevant parameters influencing spring discharge. *J. Hidrol.*, 427, 112-123. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.021>.
- Duran, L., Massei, N., Lecoq, N., Fournier, M., Labat, D. 2020. Analyzing multi-scale hydrodynamic processes in karst with a coupled conceptual modeling and signal decomposition approach. *J. Hidrol.*, 583, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124625>.
- Dragicevic, N.; Karleusa, B.; Ozanic, N. 2016. A review of the Gavrilovic method (Erosion Potential Method) application. *Gradevinar, Croatian*, 9, 715-725. <https://doi.org/10.14256/JCE.1602.2016>
- Easton, Z.M., Fuka, D.R. 2008. Walter, M.T, Cowan, D.M., Schneiderman, E.M., Steenhuis, T.S. Re-conceptualizing the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model to predict runoff from variable source áreas. *J. Hydrol.*, 348, 279-29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.008>
- Ferrari, J.A, Karmann, I. 2008. Comportamento Hidrodinâmico de Sistemas cársticos na Bacia do Rio Betari, Município de Iporanga - SP. *Geologia -SP: Série Científica*, .8, 1, 1-70. <http://dx.doi.org/10.5327/z1519-874x2008000100001>
- Feng, T., Chen, H., Polyakov, V. O., Wang, K., Zhang, X., Zhang, W. 2016. Soil erosion rates in two karst peak-cluster depression basins of northwest Guangxi, China: Comparison of the RUSLE model with 137Cs measurements, *Geomorphology*, 253, 217-224. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.10.013>.
- Flanagan, D. C. Gilley, J. E. Franti, T. G. 2007. Water Erosion Prediction Project (WEPP): Development History, Model Capabilities, and Future Enhancements. *Transactions of the ASABE*. 50, 5, 1603-1612. <https://doi.org/10.13031/2013.23968>.
- Fleury, P. 2007. Plagnes, V., Bakalowicz, M. Modelling of the functioning of karst aquifers with a reservoir model: Application to Fontaine de Vaucluse (France). *J. Hydrol.* 345, 2, 38-49. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.07.014>.
- Ford, D.C. Williams, P. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley, Chichester, 562. 2007. <https://doi.org/10.1002/9781118684986>
- Godoi, R., Rodrigues, D. B. B., Borrelli, P., Oliveira, P. T. S. 2021. High-resolution soil erodibility map of Brazil. *Science of The Total Environment*. 781. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146673>.
- Goldscheider N, Drew D. 2007. *Methods in Karst Hydrogeology*. International Association of Hydrogeologists, Taylor & Francis, London, 264.
- Gavrilovic, S. 1988. The use of empirical method (erosion potential method) for calculating sediment production and transportation in unstudied or torrential streams. *International Conference for Review Regime*, 411– 422.
- Grácio, M. C. C. 2016. Acoplamento bibliográfico e análise de cocitação: revisão teórico-conceitual. *Encontros Bibli: Revista Eletrônica de Biblioteconomia e Ciência da Informação*, 21, 47, 82-99. <https://doi.org/10.5007/1518-2924.2016v21n47p82>
- Hartmann, J., Moosdorf, N., Lauerwald, R., Hinderer, M., West, A.J. 2014. Global chemical weathering and associated p-release - the role of lithology, temperature and soil properties. *Chemical Geology*, 363, 145-163, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.10.025>
- Iritani, M. A., Ezaki, S. 2009. *As águas subterrâneas do Estado de São Paulo*. São Paulo: Secretaria do Estado do Meio Ambiente- SMA, 2nd, 104.
- Oliveira, P. T. S. Sobrinho, T. A., Rodrigues, D. B., Panachuki, E. 2011. Erosion Risk Mapping Applied to Environmental Zoning. *Water Resources Management*, 25, 3, 1021-1036. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9739-0>
- Oliveira, A. H., Silva, M. A., Silva, M. L., Curi, N., Neto, G. K., Freitas, D. A. 2013. Development of Topographic Factor Modeling for Application in Soil Erosion Models. In: Soriano, M. *Soil Processes and Current Trends in Quality Assessment*. Rijeka, InTech, 2013. 4, 111-138. <https://doi.org/10.5772/54439>
- Jakada, H., Chen, Z. 2020. An approach to runoff modelling in small karst watersheds using the SWAT model. *Arab J Geosci.*, 13. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05291-0>

- Janza, M. 2010. Hydrological modeling in the karst area, Rižana spring catchment, Slovenia. *Environ. Earth Sci.*, 61, 909-920. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0406-9>
- Jeannin, P., Artigue, G., Butscher, C., Chang, Y., Charlier, J., Duran, L., Gill, L., Hartmann, A., Johannet, A., Jourde, H., Kavousi, A., Liesch, T., Liu, Y., Lüthi, M., Malard, A., Mazzilli, N., Igúzquiza, E., Thiéry, D., Reimann, T., Schuler, P., Wöhling, T., Wunsch, A. 2021. Karst modelling challenge 1: Results of hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 600, 126508, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126508>.
- Johannet, A., Taver, V., Vinches, M., Borrell-Estupina, V., Pistre, S., Bertin, D. 2015. Comparison Between Inverse Modelling and Data Assimilation to Estimate Rainfall from Runoff Using the Multilayer Perceptron. *Internat. Joint Conf. on Neural Networks*, 1-8. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2015.7280427>
- Kalhor, R., Azmal, M., Khosravizadeh, O., Moosavi, S., Asgari, M.S., & Gharaghieh, F. 2017. Nurses perception of evidence-based knowledge, attitude and practice: A quantitative study in teaching hospitals. *Evidence Based Health Policy, Management & Economics*, 1, 2, 103-111.
- Karmann, I. Cárste e Cavernas no Brasil: distribuição, dinâmica atual e registros sedimentares, breve histórico e análise crítica das pesquisas realizadas no âmbito do IGc USP. São Paulo. 2016. 62. <http://dx.doi.org/10.11606/T.44.2017.tde-15022017-091311>
- Kouhpeima, A. Hashemi, S. A. A. Feizn, S. 2011. A study on the efficiency of Erosion Potential Model (EPM) using reservoir sediments. *Elixir International Journal, Copernicus*, 38, 4135-4139, Polony.
- Kourgialas, N. N., Karatzas, G.P., Nikolaidis, N. P., 2010. An integrated framework for the hydrologic simulation of a complex geomorphological river basin. *Journal of Hydrology* 381, 4, 308–321. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.12.003>
- Kovács, A., Sauter, M. Modelling karst hydrodynamics. In book: Goldscheider, Drew, D. *Methods in Karst Hydrogeology*. 2006. Ed International contribution to hydrogeology, 26.
- Long, A. J., Putnam. L.D. 2004. Linear model describing three components of flow in karst aquifers using ¹⁸O data. *Journal of Hydrology*. 296, 1-4, 20, 254-270. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.023>
- Loncar, G., Šreng, Z., Bekic, D., Kunštek, D. 2018. Hydraulic-Hydrology Analysis of the Turbulent Seepage Flow within Karst Aquifer of the Golubinka Spring Catchment *Geofluids*. Hindawi, *Geofluids*. <https://doi.org/10.1155/2018/6424702>.
- Marques, J. J, Curi, N., Lima, J.M., Ferreira., Silva, M.L.N., Ferreira, D.F. 1997. Estimativa da erodibilidade a partir de atributos de solos com horizonte B textural no Brasil. *Rev. Bras. de Ci. Solo*, Viçosa, 21, 3, 457-465. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831997000300015>
- Malago, A., Efstathiou, D., Bouraoui, F., Nikolaidis, N.P., Franchini, M., Bidoglio, G., Kritsotakis, M. 2016. Regional scale hydrologic modeling of a karst dominant geomorphology: The case study of the Island of Crete. *J. Hydrol.*, 540, 64-81. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.061>
- Mahler, B. J., Jiang, Y., Pu, J., Martin, J.B. 2021. Editorial: Advances in hydrology and the water environment in the karst critical zone under the impacts of climate change and anthropogenic activities, *Journal of Hydrology*, 595, 125982. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.125982>.
- Manziona, R. L.; Soldera, B. C.; Wendland, E. C. 2017. Groundwater system response at sites with different agricultural land uses: case of the Guarani Aquifer outcrop area, Brotas/SP-Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, 62, 28-35. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1154148>
- Mariano, A. M., Rocha, M. S. 2017. Revisão da Literatura: Apresentação de uma Abordagem Integradora. XXVI Congresso Internacional AEDEM. Economy, Business and Uncertainty: ideas for a European and Mediterranean industrial policy, Reggio Calabria (Italia).
- Mazzilli, N., Mazzilli, V., Guinot, H., Jourde, N., Lecoq, D., Labat, B., Arfib, C., Baudement, C., Danquigny, L. Dal Soglio, D. 2019. KarstMod: A modelling platform for rainfall – discharge analysis and modelling dedicated to karst systems. *Environ. Model. Softw.*, 122, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.015>
- Nikolaidis, N.P., Bouraoui, F., Bidoglio, G. 2013. Hydrologic and geochemical modeling of a karstic Mediterranean watershed. *J. Hydrol. Eng.*, 477, 129-138. <https://doi.org/10.5194/hessd-9-1-2012>
- Oliveira, Z. O., Barroso, E. H., Milhomem, P.M., Monteiro, S. B. S. 2020. Modelos de Maturidade de Gestão do Conhecimento Aplicados nas Organizações: Uma Revisão da

- Literatura. Rev. Lat.-Am. Inov. Eng. Prod. Curitiba, Paraná. 8, 13, pp. 172-186. <https://doi.org/10.5380/relainep.v.8i13.73929>
- Olivetti, D., Mincato, R. L., Ayer, J.E.B., Silva M.L.N., Curi, N. 2015. Spatial and Temporal Modeling of Water Erosion in Dystrophic Red Latosol (Oxisol) used for Farming and Cattle Raising Activities in a Sub-Basin in the South of Minas Gerais. *Ciênc Agrotec.* 39, 58-67. <https://doi.org/10.1590/S141355670542015000100007>.
- Palanisamy, B., Workman, S.R. 2015. Hydrologic Modeling of Flow through Sinkholes Located in Streambeds of Cane Run Stream, Kentucky. *J. Hydrol. Eng.*, 20, 5, 1-12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001060](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001060)
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Van der Zanden, E. H., Poesen, J., Alewell, C. 2015. Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. *Envir. Sci Policy.* 51, 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.03.012>.
- Partington, D., Brunner, P., Simmons, C.T., Werner, A.D., Therrien, R., Maier, H.R., Dandy, G.C. 2012. Evaluation of outputs from automated baseflow separation methods against simulated baseflow from a physically based, surface water-groundwater flow model. *J. of Hydrol.*, 459, 28-39. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.029>
- Park, S., Nielsen, A., Bailey, R.T., Trolle, D., Bieger, K. 2019. A QGIS-based graphical user interface for application and evaluation of SWAT-MODFLOW models. *Environmental Modelling & Software*, 111, 493-497. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.10.017>
- Poulain, A., Watlet, A., Kaufmann, O., Van Camp, M., Jourde, N., Mazzilli, N., Rochez, G., Deleu, R., Quinif, Y., Hallet, V. 2018. Assessment of groundwater recharge processes through karst vadose zone by cave percolation monitoring. *Hydrol. Process.*, 32, 2069-2083. <https://doi.org/10.1002/hyp.13138>
- Renard, K.G, Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). 703. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook, 1997.
- Rimmer, A., Y. Lechinsjy, S. 2006. Modelling precipitation-streamflow processes in Karst basin: The case of the Jordan River sources, Israel. *Journal of Hydrology*, 331, 4, 524-542. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.06.003>
- Rozos, E., Koutsoyiannis, D. 2006. A multicell karstic aquifer model with alternative flow equations. *J. Hydrol.*, 325, 1-4, 340-355. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.10.021>
- Samuels, R., Rimmer, A., Hartmann, A., Krichak, S., Alpert, P. 2010. Climate change impacts on Jordan river flow: Downscaling application from a regional climate model. *J. Hydrometeo.*, 11, 4, 860-879. <https://doi.org/10.1175/2010JHM1177.1>
- Silva, M.L.N., Curi, N., Ferreira, M.M., Lima, J.M., Ferreira, D.F. 1999. Proposição de modelos para estimativa da erodibilidade de Latossolos brasileiros. *Pesqui Agropec Bras.* 34, 2287-2298. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999001200016>
- Sezen, C., Bezak, N., Bai, Y., Šraj, M. 2019. Hydrological modelling of karst catchment using lumped conceptual and data mining models. *Journal of Hydrology*, 576, 98-110. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.036>.
- Sophocleous, M.A.; Perkins, S.P. 2000. Methodology and application of combined watershed and ground-water models in Kansas. *J. of Hydro.* 236, 3-4, 185-201. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00293-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00293-6)
- Sullivana, T.P., Gao, Y., Reimann, T. 2019. Nitrate transport in a karst aquifer: Numerical model development and source evaluation. *J. Hidrol.*, 573, 432-448. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.078>
- Spalevic, V. 2011. Impact of land use on runoff and soil erosion in Polimlje. Doctoral thesis, Faculty of Agriculture of the University of Belgrade, Serbia, 260. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25228.36486>
- Spruill, C. A., Workman, S. R., Taraba, J. L. 2000. Simulation of daily stream discharge from small watersheds using the SWAT model. *ASAE-American Society of Agricultural Eng.*, 43, 6, 14-31. <https://doi.org/10.13031/2013.3041>
- Tavares, A. S. 2017. Modelagem da Erosão Hídrica pelo Método de Erosão Potencial em uma Sub-bacia Hidrográfica de Referência no Sul de Minas Gerais. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Alfenas, UNIFAL, 73.
- Torre, B., Gil-Márquez, J.M., Mudarra, M., Andreo, B. 2023. Towards a better understanding of flow-related processes in the vertically distributed compartments of karst aquifers by combining natural tracers and stable isotopes, *Journal of Hydrology*, 620, 9, 129392. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129392>.
- Travassos, L. E. 2019. Princípios de Carstologia e Geomorfologia cárstica. Instituto Chico Mendes

- de Conservação da Biodiversidade – ICMBio, Brasília, 246.
- Tzoraki, O., Nikolaidis, N.P. 2007. A generalized framework for modeling the hydrologic and biogeochemical response of a Mediterranean temporary river basin. *J. Hidrol.*, 346, 3-4, 112-121. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.08.025>
- Vigiak, O., Malagó, A., Bouraoui, F., Vanmaercke, M., Poesen, J. 2015. Adapting SWAT hillslope erosion model to predict sediment concentrations and yields in large Basin. *Sci. Total Environ.*, 538, 855-875. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.095>
- Volk, M., Bosch, D., Nangia, V., Narasimhan, B. 2017. SWAT: Agricultural water and nonpoint source pollution management at a watershed scale - Part II. *Agricultural Water Management*, 180, 31, 191-193. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.06.013>
- Wu, Q., Deng, C., Chen, Z. 2016. Automated delineation of karst sinkholes from LiDaR - derived digital elevation models. *Geomorphology*, 266, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.05.006>
- Woodbury, J. D., Shoemaker, C. A., Easton, Z. M., Cowan, D. M. 2014. Application of SWAT with and without variable source area hydrology to a large watershed. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 50, 42-56. <https://doi.org/10.1111/jawr.12116>
- Xu, A., Wang, F., Li, L. 2023. Vegetation information extraction in karst area based on UAV remote sensing in visible light band, *Optik*, 272, 170355. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.170355>.
- Yachtao, G. A. 2009. Modification of the SWAT model to simulate hydrologic processes in a karst influenced watershed. MS thesis. Blacksburg, Va.: Virginia Tech, Department of Biosystems Engineering.
- Yan, B., Fang, N. F., Zhang, P. C., Shi, Z. H. 2013. Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: an assessment using hydrologic modeling and partial least square regression. *J. Hydrol.*, 484, 26-37. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.008>
- Yona, M. B., Rimmer, A., Shamir, E., Litaor, I. 2020. Hydrologic response in the karstic and basaltic hydro-geological units of Lake Kinneret watershed. *J. Hidrol.*, 583, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124572>
- Zhang, Z., Chen, X., Ghadouani, A., Shi, P. 2010. Modelling hydrological processes influenced by soil, rock and vegetation in a small karst basin of southwest China. *southwest China, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 7, 561-592, <https://doi.org/10.5194/hessd-7-561-2010>.