

ESTADO DA ARTE: APLICAÇÃO DO MODELO SWAT NO RELEVO CÁRSTICO

Ludmagna Pereira de Araújo
Universidade de Brasília – UnB
Brasília, Distrito Federal, Brasil
lparaju@yahoo.com

Vânia Santos Figueiredo
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia, Minas Gerais, Brasil
vanciasfigueiredo@gmail.com

Michael Vandesteen Silva Souto
Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN
Natal, Rio Grande do Norte, Brasil
michael.souto@geologia.ufrn.br

RESUMO

Pesquisas sobre aplicação de modelos matemáticos em bacias hidrográficas (BH) com relevo cárstico são escassas no Brasil. O SWAT é um dos modelos hidrológicos mais utilizados internacionalmente, sendo capaz de simular diferentes processos hidrológicos em diversas escalas através de longas séries temporais. A aplicação desses modelos possibilita analisar e entender o funcionamento dos componentes de um aquífero, porém a simulação dos processos físicos e hidrológicos varia muito quanto à empregabilidade dos métodos e das técnicas usadas para a realização desses estudos. Logo, este artigo tem como objetivo destacar as principais aplicações do SWAT para bacias situadas em sistema de relevo cárstico. A metodologia da pesquisa abrangeu três etapas da Revisão Sistemática de Literatura (RSL): a) planejamento; b) técnica de seleção; e c) avaliação. Foram selecionados 19 estudos internacionais com RSL. Todavia, quatro estudos nacionais tiveram destaque; destes, três em bacias do bioma Cerrado. Com base nessa investigação, foram identificadas lacunas nas pesquisas envolvendo a temática, assim como estratégias para detecção da sensibilidade dos parâmetros e das variáveis, prejuízos e benefícios relativos à geração de escoamento em uma bacia de difícil recobrimento por métodos tradicionais.

Palavras-chave: Revisão sistemática de literatura. Geração de escoamento. Modelagem hídrica. Uso da terra.

STATE OF THE ART: APPLICATION OF THE SWAT MODEL IN CARSTIC RELIEF

ABSTRACT

Research on the application of mathematical models in watersheds (WS) with karst relief is scarce in Brazil. SWAT is one of the most used hydrological models internationally; it can simulate different hydrological processes at different scales through long time series. The application of these models makes it possible to analyze and understand the functioning of the components of an aquifer, but the simulation of physical and hydrological processes varies greatly as to the employability of the methods and techniques used to carry out these studies. Therefore, this article aims to highlight the main applications of SWAT for basins located in a karst relief system. The research methodology covered three stages of the Systematic Literature Review (SLR): a) planning; b) selection technique; and c) evaluation. We selected 19 international studies with SLR. However, four national studies stood out; of these, three were conducted in basins of the *Cerrado* biome. Based on this investigation, we identified gaps in research involving the theme, as well as strategies for detecting the sensitivity of parameters and variables, losses and benefits related to the generation of runoff in a basin that is difficult to cover by traditional methods.

Keywords: Systematic literature review. Runoff generation. Water modeling. Land use.

INTRODUÇÃO

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) congrega diversos algoritmos que simulam os processos físicos, químicos e biológicos em escala de bacia hidrográfica (SWAT, 2021). Simula bacias de diferentes escalas, a partir de um conjunto de dados necessários para representar respostas dos processos hidrológicos que

ocorrem, por exemplo, no balanço hídrico (SPRUILL, WORKMAN e TARABA, 2000; NEITSCH et al., 2011; TIAN et al., 2016; HOU e GAO, 2019; ARAÚJO e FIGUEIREDO, 2021). A modelagem hidrossedimentológica consegue representar processos do ciclo hidrológico (SWAT, 2021). Neitsch et al. (2011) enfatizam que o ciclo hidrológico é um processo dinâmico que representa os diferentes caminhos espaço-temporais percorridos pelos processos hidrológicos e sedimentológicos em bacias.

Uma mensuração sistemática é importante para apoiar a gestão e dar suporte à tomada de decisão visando a prognosticar o impacto no uso do solo e nos recursos hídricos (AFINOWICZ, MUNSTER e WILCOX, 2005; BAFFAUT e BENSON, 2009; AMATYA; JHA e EDWARDS, 2011; WANG e BRUBAKER, 2014). Dessa forma, o uso de geotecnologias é de fundamental importância na geração desses modelos, que visam a expressar e mensurar a dinâmica dos recursos naturais e suas relações, a partir da análise das multivariáveis do modelo (VALE e HOLMAN, 2009; NIKOLAIDIS, BOURAOUI e BIDOGLIO, 2013; WILLIAMS et al., 2014; SULLIVAN e GAO, 2017; VIGIAK et al., 2017).

Malagò et al. (2016), Araújo e Figueiredo (2021) observaram que tem crescido bastante o uso de novos métodos para integrar as tecnologias, assim como registros da pesquisa pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES; BRASIL, 2019) expressando o número de publicações voltadas para o emprego de novas orientações teórico-metodológicas referentes à aplicação do SWAT em bacias hidrográficas (BH) com feições calcárias. Nesse propósito, novas tecnologias aliadas à ciência geográfica favorecem novas formas de pensar e refletir sobre o espaço geográfico, as interações homem-natureza, os conceitos, as teorias e os métodos empregados nas pesquisas. Nesse contexto, o propósito deste trabalho foi discutir os artigos internacionais e metodologias empregadas na aplicação do SWAT em sistemas cársticos, de forma automatizada ou não, pela revisão da literatura específica. A análise dos estudos desde os clássicos sobre a temática envolvida foi obtida a partir de suas definições, das entradas e saídas do modelo, o processamento utilizado para determinado recurso natural e a solução ambiental.

Ainda nessa perspectiva, a escolha deste estudo é uma tentativa de discutir o desenvolvimento teórico-metodológico ao nível internacional, no campo do conhecimento de cunho geográfico, entre outros, bem como conhecer as técnicas voltadas para modelagem dos fluxos pelos canais em ambientes de rochas calcárias utilizando o modelo. Dessa forma, Araújo et al. (2004) frisam que a integradora plataforma do Sistema de Informações Geográficas (SIG) proporciona novas formas de refletir o espaço geográfico, acessível a diversas áreas do conhecimento, abstraindo o mundo real para o computacional, possibilitando unir materiais e métodos de gerenciamento do território a partir dos dados de entrada (dado alfanumérico, *raster* e vetor).

Além disso, o SIG favorece a utilização de algoritmos para realização de complexas equações e detecção de quais parâmetros e/ou variáveis são mais sensíveis, entre outros. Nesse sentido, os modos de organização do ambiente modificado pelo homem levam pesquisadores a repensarem métodos de aplicação dos grandes conjuntos de dados dinâmicos, originando resultados eficazes, de maior confiabilidade e o mais próximo possível da realidade (MALAGÔ et al., 2016; TIAN et al., 2016; HOU e GAO, 2019; ARAÚJO e FIGUEIREDO, 2021). Nesse contexto, o propósito deste trabalho foi discutir os artigos internacionais e as metodologias empregadas na aplicação do SWAT em sistemas cársticos, de forma automatizada ou não, pela revisão da literatura específica em língua portuguesa, de pesquisas que tiveram bons resultados. Logo, a Revisão Sistemática de Literatura (RSL) narrativa, favorece a detecção das abordagens e das principais lacunas de pesquisas (SOUZA et al., 2019). O presente estudo insere-se em uma pesquisa de doutorado, desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Geografia (POSGEA) da Universidade de Brasília (UnB).

MÉTODO DE TRIAGEM DA PESQUISA

A fundamentação teórica e metodológica deste artigo está calcada no levantamento de publicações (revistas e/ou jornais) com o intuito de analisá-los, observando a evolução das técnicas que podem ser apreendidas, para obter novas capacidades e habilidades acerca das variáveis que abordam a temática. Este trabalho visou a reunir os estudos que aplicaram o SWAT no complexo ambiente de rochas carbonáticas. Para isso, foram ilustrados os meios e as diversas técnicas empregadas, além das teorias e manuseio do modelo.

Conforme Souza et al. (2019), a RSL é um método de revisão do “estado da arte”, de caráter bibliográfico, visa a coletar, avaliar, sintetizar e manter atuais os pontos relevantes de estudos anteriormente publicados, aplicando uma metodologia clara e reproduzível. Nesse cenário, a pesquisa bibliográfica foi realizada em maio de 2019. Contudo, a revisão da literatura abrangeu uma abordagem analítica dos dados, envolvendo

as seguintes etapas: a) planejamento; b) técnica de seleção; e c) avaliação. No Quadro 1, estão descritas cada uma das etapas da revisão.

Quadro 1 - Etapas da abordagem analítica dos dados na RSL.

ETAPA	ABORDAGEM ANALÍTICA DOS DADOS
1	Buscou-se pelos termos “SWAT” e “Karst” expressos na língua inglesa, a partir da pesquisa no Portal da CAPES (BRASIL, 2021) através da plataforma indexadora <i>Web of Science</i> . Foram levantados 22 estudos. Destes, 19 estudos internacionais foram selecionados entre os anos de 2000 e 2019 com RSL da literatura, para verificar as tendências de publicação. Os critérios selecionados referem-se a processos hidrossedimentológicos com resultados satisfatórios.
2	Extração dos materiais e técnicas relevantes, vislumbram questões de análise, tais como: i) que tecnologias e fontes foram utilizadas, métodos de preparo dos dados, formatos e armazenamento? ii) o que é necessário para adaptar o modelo? Como fizeram? iii) quais foram e como apresentaram as saídas do modelo? iv) quem trabalhou com ambiente de cavernas, sumidouros, modelo hídrico e sedimentar? v) quais foram as contribuições, progressos e problemas detectados durante a pesquisa (lacunas)?
3	Avaliação dos resultados.

Fonte - Os autores(2022).

A compilação do material anteriormente mencionado foi estruturada com base no objetivo deste artigo, conforme quatro critérios definidos, a saber: a) dados de entrada; b) processamento; c) saídas dos dados; e d) problemas e soluções. A seguir, há uma breve definição de cada um desses critérios.

a) Dados de Entrada: trata de aspectos relevantes no delineamento das bacias, composição das Unidades de Respostas Hidrológicas(HRU), uso e cobertura da terra, solos, topografia e dados multitemporais das estações meteorológicas.

b) Processamento: consiste nos procedimentos metodológicos relevantes e pouco corriqueiros, envolvendo a simulação.

c) Saídas dos dados: criação de cenários e resultados alcançados.

d) Problemas e soluções: tratam da evolução do estudo e dos ajustes necessários para modelar o ambiente cárstico.

Nesse cenário, foi observado no levantamento feito que a primeira publicação surgiu em 2000 e o número de artigos gerado para o tema desta pesquisa triplicou a partir de 2013. A intenção do levantamento foi de avaliar o modelo utilizado, parâmetros e demais soluções encontradas nos estudos, observação dos comandos, parâmetros e variáveis mais utilizáveis, além dos resultados alcançados, voltados para o modelamento dos processos hidrossedimentológicos no relevo cárstico.

De acordo com alguns conceitos aprendidos no POSGEA da UnB, buscou-se detectar novos fatos e fenômenos, observados de forma distinta que mais se destacaram. Após a leitura, considera-se que a organização dos estudos segue uma sistematização, com objetivos bem definidos, análise da temática, destacando partes importantes dos textos, com a intenção de identificar uma evolução teórico-metodológica desses estudos.

MODELO SWAT EM SISTEMAS CÁRSTICOS

Conforme o levantamento dos estudos realizados na pesquisa da plataforma *Web of Science*, o SWAT é um modelo matemático que vem sendo aplicado recentemente, a partir do ano 2000, em bacias hidrográficas cársticas. Dessa forma, o SWAT desenvolvido em 1996 pelo *United States Department of Agriculture(USDA)* e *Texas A. & M. University College Station (TAMU)* nos *United States of America (USA)* vem sendo atualizado, incorporando uma evolução das versões anteriores através de algoritmos que vinculam equações diversas. Possui código livre e utiliza “interface” vinculada à plataforma SIG.

Baffaut e Benson (2009) consideram que as atividades antrópicas, tais como agricultura, pecuária, turismo e áreas urbanizadas, acentuam ainda mais os potenciais de contaminação das bacias calcárias. Logo, a modelagem de aquíferos cársticos é importante para poder entender o funcionamento dos

componentes dos aquíferos raso e profundo, do balanço hídrico e do fluxo, para definição do melhor gerenciamento e manejo desses valiosos recursos.

Por conseguinte, o emprego de modelos auxilia gestores ambientais no diagnóstico de bacias, em prol do manejo dos elementos da paisagem calcária, ligados aos fatores do ciclo hidrológico, sejam eles de fluxo, recarga e descarga do aquífero, que estão associados aos dados da topografia, categorias de solo e de uso da terra (BAFFAUT e BENSON, 2009). Nesse sentido, Baffaut e Benson (2009) ponderam que os sistemas cársticos são originados da paisagem geológica de rocha sedimentar, cuja composição primária é de carbonatos, com meio poroso amplo e complexo, poros de tamanhos diversos, que, em contato com a ação dissolvente da água, torna-se quimicamente solúvel.

Com relação ao ciclo hidrológico, a água das chuvas é uma fonte de energia primária, a qual remodela as rochas carbonáticas, leva embora os íons por dissolução e atua como um agente modelador do relevo, infiltrando-se através da rocha calcária, dando origem a uma hidrologia típica de relevo cárstico, induzindo na formação de múltiplas nascentes, sumidouros, cavernas e córregos temporários, com conexões diretas entre águas superficiais e subterrâneas, através do sistema aquífero fissural-cárstico, cujas nascentes, riachos e lençóis freáticos estão passíveis de contaminação (MALAGÔ et al., 2016).

Para Baffaut e Benson (2009), com a progressiva dissolução da rocha carbonática, o fluxo de água subterrânea e dos grandes vazios verticais no aquífero cárstico migra de um pequeno e simples escoamento de uma rede de fissuras inter-relacionadas para um complexo e concentrado escoamento por vários canais interconectados, constituindo sistemas de cavernas. Sendo assim, esses recursos hídricos contêm conexões diretas entre as águas superficiais e subterrâneas, havendo um potencial risco de contaminação de seus riachos, nascentes e lençóis freáticos'.

Todavia, o ponto de saída comumente é um sumidouro. Trata-se da extremidade a jusante de um sistema aquífero fissural-cárstico, onde o conduto subterrâneo atinge a superfície (MALAGÔ et al., 2016). Por tudo isso, os aquíferos cársticos e suas nascentes são importantes fontes de abastecimento, necessitando de táticas especiais para gerenciamento da quantidade e da qualidade de suas águas.

No entanto, é recomendável empreender metodologias abrangentes nos sistemas cársticos, para avaliar riscos para gerenciar as águas de forma sustentável (MALAGÔ et al., 2016). Os autores afirmam que, infelizmente, a maioria dos países tem gerenciamento atrasado no monitoramento da descarga de nascentes ou poços, e a exploração de aquífero cárstico, em geral, é ineficaz.

Segundo Hou e Gao (2019), comparado a outros modelos hidrológicos (distribuídos e conceituais), o modelo SWAT é mais indicado porque é estruturado nos processos hidrológicos e erosivos, entre outros. É eficaz devido à praticidade do universo que envolve as equações, parâmetros e variáveis, quando os dados estão disponíveis.

Salerno e Tartari (2009) proferem que existem três categorias de modelos hidrológicos matemáticos que podem ser aplicados a um sistema cárstico, tais como: conceituais empíricos (o mais simples) e teóricos ou físicos, calcados nas leis hidráulicas, assim como nos processos físicos, nos componentes das rochas, na geometria e na posição das fraturas dos condutos sob as interações de fluxo. Em razão disso, os modelos empíricos não pedem dados sobre a estrutura interna de um aquífero, pois carecem de relações dos cálculos entre as séries temporais de entrada e saída, especialmente adequados para aquíferos cársticos.

A partir dos estudos acima mencionados, chegou-se a um breve conhecimento sobre a aplicação do modelo SWAT, para compreensão das abordagens utilizadas pelos autores. A seguir, é apresentado o escopo do estudo, que vislumbra a evolução das técnicas desenvolvidas.

ESTADO DA ARTE: APLICAÇÃO DO SWAT E EMPREGO DAS METODOLOGIAS

Um modelo hidráulico-hidrológico pode ser usado para desenvolver um plano de manejo eficaz em bacias hidrográficas, visando a melhorar a qualidade da água. Todavia, os relevos cársticos exibem desafios singulares no gerenciamento e manejo dos impactos em águas superficiais e subterrâneas.

É fato que as cargas hidrossedimentares deterioram o estado ecológico de corpos de água doce em todo o mundo. Os hidrossedimentos impactam o "habitat" aquático em fatores como turbidez, penetração da luz, temperatura da água e oxigênio biologicamente disponível (BAFFAUT e BENSON, 2009; AMIN et al., 2017; VIGIAK et al., 2017; AMIN et al., 2018).

Entende-se que os estudos preenchem uma lacuna em pesquisas anteriores que utilizaram as características de deflúvios baseados em estatísticas sobre diferentes categorias de uso da terra e índices de escoamento.

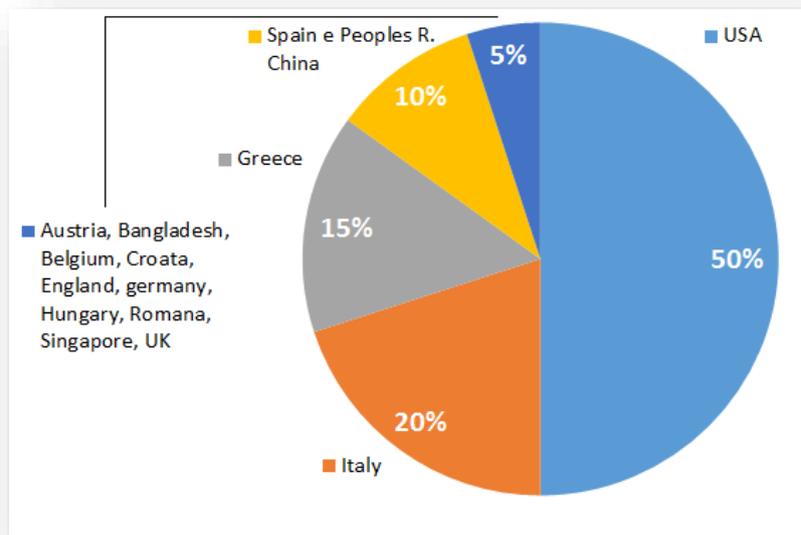
Observou-se que, em seus trabalhos, muitos autores exibem a avaliação satisfatória nos resultados da simulação somente porque algumas combinações de parâmetros atingiram os níveis ideais. Assim, vislumbram a evolução de modelos de simulação e a otimização metódica dos processos hidrológicos, considerando as condições hidrológicas aperfeiçoadas e realistas das áreas calcíferas.

Análogo ao universo da pesquisa, a ocorrência dos principais centros, países/regiões e os registros citados na pesquisa CAPES (BRASIL, 2019) estão especificados na Figura 1.

No tocante ao número total de citações (Figura 2), o trabalho de Spruill, Workman e Taraba (2000) é o registro mais citado na pesquisa *Web of Science*, pontuando 154 citações, seguido por Baffaut e Benson (2009), com 42 citações, e Salerno e Tartari (2009), com 35 citações.

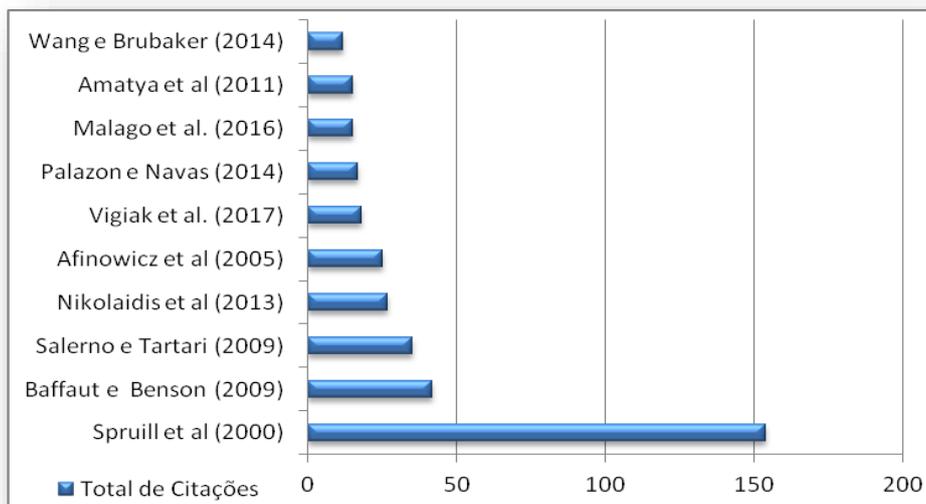
O primeiro autor/ano dos trabalhos selecionados citados na pesquisa da CAPES (BRASIL, 2019) por número total de citações/ano está disposto no gráfico da Figura 2.

Figura 1 - Percentual dos principais países/regiões segundo registros da CAPES(BRASIL, 2019).



Fonte - BRASIL(2019).

Figura 2 - Autor/ano por número de citações/ano de acordo com registro da CAPES (BRASIL, 2019).



Fonte - BRASIL (2019).

Nesse sentido, de acordo com registros do levantamento da pesquisa CAPES (BRASIL, 2019), observou-se crescimento em quantidade e qualidade dos trabalhos que utilizaram o SWAT como modelo de análise em feições calcárias envolvendo processos hidrológicos e sedimentares nas bacias hidrográficas. O trabalho de Spruill, Workman e Taraba (2000) foi um dos primeiros registros no levantamento da plataforma CAPES (BRASIL, 2019).

O **Quadro 2** resume as características de cada estudo, desde categorias de modelagem realizada na pesquisa por trabalho/autores, os ajustes necessários no modelo, a plataforma de dados utilizada, até algumas técnicas alternativas de obtenção dos dados na pesquisa.

Quadro 2 - Dados referentes ao modelo utilizado, às modificações e a algumas geotecnologias auxiliares.

N.º	Refs.	Local	Área	Modelo	Modelagem	SWAT	Cárstico	Técnica							
					Água	Sedimento	Alterada	Cavernas	Bati	Rad	LiD	LAN	CLC	Fot	
1	Afinowicz, Munster e Wilcox (2005)	Texas, USA	360 km ²	ArcGis	*		*					*			
2	Amatya et al. (2011)	South Carolina, USA	1.555 ha	SWAT2003 ISWAT	*			*	*	*	*				*
3	Amin et al. (2017)	Pennsylvania, USA	370 km ²	Regular-SWAT e Topo-SWAT Karst SWAT ArcGis	*	*	*								
4	Amin et al. (2018)	Pennsylvania, USA	370 km ²	Topo-SWAT uma variação do SWAT	*	*	*								
5	Baffaut e Benson (2009)	Missouri, USA	3.600 km ²	AVSWATX - SWAT (v. 2005) (SWAT B - B)	*		*								
6	Hou e Gao (2019)	China	4.681 km ²	ArcSWAT	*										
7	Jain et al. (2015)	Texas Hill Country, USA	2.126 km ²	ArcSWAT Versão 2012.10_1 .9 ArcGis 10.1	*										
8	Malagò et al. (2016)	Ilha de Creta, Grécia	8.336 km ²	SWAT2012 (v.622) KSWAT, modelo Karst SWAT	*	*	*	*							

N.º	Refs.	Local	Área	Modelo	Modelagem		SWAT	Cárstico	Técnica						
					Água	Sedimento			Alte- rada	Cav- erna- s	Bati	Rad	LiD	LAN	CLC
9	Nikolaidis, Bouraoui e Bidoglio (2013)	Ilha de Creta, Grécia	132 km ²	ArcSWAT	*		*	*							
10	Palanisamy e Workman (2015)	Kentucky, USA	115.6 km ²	Karst SWAT	*		*								*
11	Palazón e Navas (2014)	Pirenéus Centrais, Espanha	1.509 km ²	SWAT2009 (versão 93.6) ArcGis (9.3)	*	*									*
12	Salerno e Tartari (2009)	Lago Pusiano, Itália	52,5 km ²	SWAT2000 ArcSWAT	*										
13	Spruill, Workman e Taraba (2000)	Kentucky USA	52,5 km ²	SWAT2000 ArcSWAT	*	*	*								
14	Sullivan e Gao (2017)	Ilha de Creta, Grécia	5,5 km ²	SWAT GRASS (SWRRB) + CREAMS	*							*			
15	Tian et al. (2016)	China	1.077 km ²	ArcSWAT ArcGis	*	*	*								*
16	Vale e Holman (2009)	País de Gales, UK	2.248,49 km ²	ArcSWAT	*										
17	Vigiak et al. (2017)	Bulgária, Europa	2.049 ha	SWAT	*	*									
18	Wang e Brubaker (2014)	Virgínia, USA	800.000 km ²	ArcSWAT	*		*								
19	Williams et al. (2014)	South Carolina, USA	14.679 m ²	SWAT, ISWAT	*			*							*

Fonte - Adaptado de Araújo e Figueiredo (2021, p. 74).

SÍNTESE DAS PESQUISAS

Os registros feitos no portal da CAPES (BRASIL, 2019) foram bem-sucedidos, representando um ícone na temática em questão. Um breve resumo das pesquisas, envolvendo meios, técnicas relevantes e principais teorias no manuseio está exposto nos **Quadro 3**, **Quadro 4** e **Quadro 5**. Observa-se que alguns autores utilizaram a mesma bacia para consolidar seus estudos.

Quadro 3 - Aspectos dos tipos de modelagem conforme registro da CAPES (BRASIL, 2019).

Nº	REF.	MODELAGEM	BACIA
1	Afinowicz, Munster e Wilcox (2005)	Modelaram os efeitos no gerenciamento de moitas para provisão da água	A BH associada ao North Fork do Rio Guadalupe Superior em Rangeland, Edwards Plateau. Texas, USA
2	Amatya et al. (2011)	Testaram o SWAT em uma BH cárstica na previsão de processos hidrológicos e na emissão e/ou não de fontes pontuais de contaminação	BH de Chapel Branch Creek (CBC). Carolina do Sul, USA
3	Amin et al. (2017)	Modelaram o transporte de fluxo e poluente	BH de Spring Creek, no Condado de Center. Pensilvânia, USA
4	Amin et al. (2018)	Estudaram o impacto da criação de gado leiteiro na conservação da qualidade da água	BH de Spring Creek, condado de Center. Pensilvânia, USA
5	Baffaut e Benson (2009)	Modelaram o transporte de fluxo e poluente	BH do Rio James. Missouri, USA
6	Hou e Gao (2019)	Simularam a geração de escoamento e sua correlação espacial com fatores ambientais	BH do Rio Sancha, nascente do Sul do Rio Wujiang. China
7	Jain et al. (2015)	Simularam o impacto hidrológico da invasão da planta Arundo donax	BH do Rio Nuances. Texas Hill Country, USA
8	Malagò et al. (2016)	Modelagem hidrológica em escala regional de geomorfologia cárstica dominante	Ilha de Creta. Grécia
9	Nikolaidis, Bouraoui e Bidoglio (2013)	Realizaram uma modelagem hidrológica e geoquímica	BH do Rio Koiliaris. Creta, Grécia
10	Palanisamy e Workman (2015)	Modelagem hidrológica de fluxo através de poços localizados em áreas ribeirinhas	BH cárstica em Cane Run Stream. Kentucky, USA
11	Palazón e Navas (2014)	Modelaram fontes e rendimentos de sedimentos em uma bacia dos Pirenéus que drena para um grande reservatório	BH do reservatório de Barasona, na bacia do Ebro. Pirenéus Centrais, Espanha
12	Salerno e Tartari (2009)	Modelagem hidrológica de superfície e Análise Wavelet (W.A.) para entender os componentes do fluxo de base da descarga fluvial em ambientes cársticos	Lago Pusiano, pertencente à BH de Caslino situada no extremo Sul dos Alpes. Itália.
13	Spruill, Workman e Taraba (2000)	Simularam a descarga diária e mensal de córregos de pequenas bacias hidrográficas usando o SWAT	Condados de Jessamine e Woodford, Lexington. Kentucky USA
14	Sullivan e Gao (2017)	Trabalharam com o método P3, método COP, vulnerabilidade de aquíferos e contaminação por nitrato; índice de intensidade de risco	Bacia do Rio Koiliaris, em Creta
15	Tian et al. (2016)	Estudaram trocas entre os ecossistêmicos na bacia com feição cárstica	BH Shibantangkarst na China, província de Guizhou
16	Vale e Holman (2009)	Pesquisaram o funcionamento hidrológico de um sistema de lago raso em um aquífero cárstico costeiro	BH de Bosherton. País de Gales, UK
17	Vígiak et al. (2017)	Modelagem de fluxos de sedimentos na bacia	BH do baixo do Rio Danúbio. Bulgária. Europa
18	Wang e Brubaker (2014)	Implementaram um módulo não linear de água subterrânea no SWAT	Vale de Shenandoah. Rio Potomac até Point Lookout Maryland. Virginia, USA
19	Williams et al. (2014)	Pesquisaram o fluxo com uma remessa a jusante no escoamento de nutrientes em uma BH de feição calcária	Planície costeira de Orangeburg County BH de Chapel Branch Creek(CBC), Lago Marion. South Carolina, USA

Fonte - Os autores (2022).

Quadro 4 - Resumo envolvendo categorias de modelagens, dados de entrada e principais resultados de acordo com registros da pesquisa CAPES (2019).

Nº	REF.	DADOS DE ENTRADA	RESULTADOS
1	Afinowicz, Munster e Wilcox (2005)	O uso compreende pastagem, reservatório (RE) e campo cultivado, obtidos do satélite LANDSAT e imagens aéreas. Escala de 1:24.000. Resolução vertical de 0,001 do <i>Digital Elevation Model</i> (DEM).	A remoção da cobertura da moita pesada resultou nas maiores alterações na evapotranspiração, no escoamento superficial, no escoamento de base e na recarga profunda. A inclinação foi encontrada para ter o maior efeito no fluxo lateral subsuperficial.
2	Amatya et al, (2011)	A cobertura consistiu de áreas agrícolas e florestais e um campo de golfe. Utilizaram DEM na escala 1: 24.000, imagem <i>Light Detection and Ranging</i> (LiDAR) e dados de curva de nível a jusante do lago.	O SWAT foi capaz de simular com precisão o fluxo mensal de descarga de água subterrânea somente após adicionar insumos subsuperficiais mensais como fonte pontual naquele local.
3	Amin et al. (2017)	O uso da terra foi de área urbana (23%), floresta (43%) e campo cultivado (34%). Utilizaram dados de solo da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO).	Os valores observados corresponderam às distribuições de nutrientes entre vias de transporte, como lixiviação e escoamento superficial.
4	Amin et al. (2018)	Inseriram dados de práticas de manejo, rotações gerais de cultura e operações agrícolas no SWAT regular, tais como: adubação, semeadura, colheita, entre outros.	Ao utilizar práticas de conservação na fazenda, haverá redução da poluição proveniente de fontes não pontuais e da erosão do solo com relação às fazendas leiteiras que não empregam Boas Práticas de Gestão (BPM).
5	Baffaut e Benson (2009)	O insumo de uso da terra foi classificado por pasto, áreas urbanas, floresta, campo cultivado e campos sépticos.	Os resultados indicaram que: a) as mudanças melhoraram a partição do fluxo entre superfície e fluxo de retorno e b) a qualidade da água indicou que o SWAT pode ser usado para simular a frequência da ocorrência das concentrações de poluentes e cargas diárias.
6	Hou e Gao (2019)	Com base na quantificação da fragmentação da paisagem, um modelo de Regressão Geométrica Ponderada (GWR) foi usado para examinar as correlações espaciais com fatores ambientais.	Resultou em dados da variabilidade espacial da cobertura e do escoamento total superficial/subterrâneo analisado juntamente com os métodos de análise de gradiente e regressão local.
7	Jain et al. (2015)	A Análise do modelo com base em SIG na Web (WHAT) foi usada para separar o fluxo medido em componentes de fluxo de base e fluxo de uma tempestade.	As vazões mostraram uma tendência positiva (levemente crescente) durante o período pré-invasão e uma tendência negativa (ligeiramente decrescente) durante os períodos pós-invasão. A estatística não paramétrica de Kendall teve êxito, a qual analisou os dados do fluxo de base e do escoamento.
8	Malagò et al. (2016)	Consistiu da cobertura do solo (Agricultura e Estatística da Grécia). Solo derivado do <i>raster</i> de 01 km da base mundial de solo da FAO.	As medições das descargas das nascentes foram calculadas diretamente medindo-se a velocidade uma vez por mês na geometria do canal transversal levantado em 47 postos permanentes.
9	Nikolaidis, Bouraoui e Bidoglio (2013)	Para medição à vazão da nascente, utilizou-se uma série de 31 anos e 1 ano de coleta de dados amostrais para nitrato. Os demais tiveram 3 anos de coleta de dados.	O SWAT foi modificado para simular as respostas hidrológica e química de sistemas cársticos e avaliar os impactos da gestão do uso da terra e das mudanças climáticas, gerido de forma intensiva na bacia.

Nº	REF.	DADOS DE ENTRADA	RESULTADOS
10	Palanisamy e Workman (2015)	Tipo de solo predominante (FAO), mapa de uso da terra do <i>Corine Land Cover</i> (CLC)	Aplicação do método de fluxo pontual incorporado no modelo para modelagem de sumidouros na feição carste.
11	Palazón e Navas (2014)	Os insumos climáticos foram dados diários mínimos e máximos de temperatura e precipitação, que fornecem a umidade, registros diários de precipitação de quatro estações.	O Karst SWAT foi capaz de reproduzir os hidrogramas, sendo observado melhor do que o SWAT em termos de fluxo de pico e volume no hidrograma.
12	Salerno e Tartari (2009)	Mapa pedológico (1:50.000), DEM, mapa de inclinação, carta litologia extraída da carta geoambiental 1:10.000. Clima precipitação e temperatura gerou o balanço hídrico.	A W.A auxiliou na análise de séries de dados gerados para interpretar descargas de sumidouros e descrever a variabilidade de fluxos provenientes dos condutos cársticos, porém os poluentes não puderam ser medidos diretamente nas concentrações de coliformes fecais.
13	Spruill, Workman e Taraba (2000)	O fluxo foi monitorado em intervalos de cinco minutos, a média de cada dia foi comparada.	Como pouca informação estava disponível sobre a sensibilidade do SWAT, um procedimento de calibração foi projetado para avaliar parâmetros que influenciam previsões de descarga.
14	Sullivan e Gao (2017)	A ferramenta SINK no ArcGIS foi usada para identificar depressões fechadas. Os erros de dados são normalmente removidos usando a ferramenta FILL para eliminar depressões abaixo de certa profundidade.	Os resultados do método P3 indicam que os dados de sensoriamento remoto são um método viável para identificar vulnerabilidades nos recursos cársticos que não foram mapeados anteriormente.
15	Tian et al. (2016)	O SWAT e o <i>Carnegie-Ames-Stanford Approach</i> (CASA) calcularam a produtividade primária líquida (NPP). Dados de sensoriamento remoto LANDSAT 7-ETM+ e eCognition 9.1 para classificar e segmentar os tipos de paisagem.	Os rendimentos de sedimentos e água exibiram uma tendência decrescente, enquanto a NPP foi inversamente variada. A NPP está em relação de escoamento com a produção de água e a produção de sedimentos.
16	Vale e Holman (2009)	Os dados observacionais das variáveis de clima/tempo foram utilizados no processo de calibração.	A descarga de águas subterrâneas costeiras tem origem tanto no escoamento dos lagos quanto no fluxo de águas subterrâneas em larga escala, anteriormente não reconhecidos, em aquífero de rochas calcárias.
17	Vigjak et al. (2017)	A gestão de sedimentos para a prestação de serviços econômicos e ambientais é abrangente. Utilizaram dados de postos coletados no percurso do rio.	Propôs modificações para adaptar o modelo original de sedimentos do SWAT a grandes bacias. A erosão de barrancos, os deslizamentos de terra e os processos de erosão de geleiras não puderam ser incluídos.
18	Wang e Brubaker (2014)	Modelo ISWAT modificado. ISWAT ambos necessitam de dados de precipitação e temperatura.	As observações do ISWAT mostram que essa suposição nem sempre é aplicável; por exemplo, nos macroporos em formações cársticas, pois afetariam seriamente o comportamento da água subterrânea.
19	Williams et al. (2014)	Compreendem áreas rurais, residenciais, de lazer, comerciais, industriais, terras agrícolas, florestais, estação de tratamento de águas residuais.	O balanço hídrico indicou um tempo de permanência que varia de seis a nove semanas. A importância do nitrogênio na descarga da nascente nas cavernas, em menor grau, o orçamento de fósforo na bacia e o papel da interação do nível do lago com o poço reduziram descargas das bacias para o lago.

Fonte - Os autores (2022).

Quadro 5 - Breve descrição envolvendo o processamento, saída de dados, principais soluções e problemas detectados nos registros da pesquisa CAPES (2019).

N°	AUTOR	PROCESSAMENTO	SAÍDA DOS DADOS	SOLUÇÕES E PROBLEMAS
1	Afinowicz, Munster e Wilcox (2005)	Simularam as condições com a cobertura de arbustos existentes em quatro cenários diferentes de remoção de arbustos. Na simulação, houve um registro climático ao longo de 15 anos, dividido em três fases distintas, de 5 anos cada: aquecimento, calibração e validação.	Criaram cenário para representar a remoção dos arbustos que estavam em locais com declive moderado ou em solos rasos. A CN2 teve base no tempo antecedente, resultando no controle do fluxo superficial.	Resultou nas maiores alterações na evapotranspiração, na recarga profunda, nos fluxos superficial e de base. A inclinação acarretou maior efeito no fluxo lateral e subsuperficial.
2	Amatya et al. (2011)	Na calibração, utilizaram valores padrão como CN2 e parâmetros de água subterrânea variando primeiro dentro dos intervalos de vazão, depois para qualidade da água. Adicionaram ponto de fonte poluente de subsuperfície para realização da simulação. Foi introduzido um algoritmo de águas subterrâneas não lineares.	Este esforço de modelagem pode ter implicações nas estimativas de nutrientes e de carreamento de sedimentos para o desenvolvimento e implementação de Carga Máxima Total Diária (TMDL) em bacias com grandes enseadas a jusante que têm mudanças significativas no nível da água devido aos lagos adjacentes.	Os resultados demonstraram a influência substancial das características cársticas no balanço hídrico, com conduto e fluxo difuso como uma explicação para a falta de fluxos a montante.
3	Amin et al. (2017)	Para simular esta BH cárstica, foram feitas representações apropriadas de águas superficiais, interações de águas subterrâneas, áreas de descarga e recarga de nascentes.	As estimativas de carga total (518 t nitrogênio/ano, 45 t fósforo/ano e 13.600 t sedimento/ano) em bacias hidrográficas estavam dentro dos 10% dos valores observados (-9,2% do percentual para nitrogênio, 6,6% para fósforo e 5,4% para sedimento).	Tanto o SWAT- regular quanto o Topo SWAT descreveram adequadamente a descarga do lençol freático com precisão diária em <i>Nash-Sutcliffe</i> (NSE). Foi selecionado o Topo SWAT para prever as cargas de nutrientes e sedimentos, o qual representou melhor a vazão do fluxo diário durante a validação.
4	Amin et al. (2018)	O Topo SWAT usou quatro cenários de criação de gado. O cenário típico também reduziu a carga de nutrientes e sedimentos em comparação com o cenário sem BPM.	Procuraram comparar qualitativamente os resultados de simulação no SWAT a partir de algumas observações de campo.	O intuito é aumentar a produtividade no sistema de cultivo e leiteiro sem deteriorar o solo e a água.
5	Baffaut e Benson (2009)	Recarga de aquífero foi calculada com uma função linear pela infiltração diária através do perfil do solo e da lagoa, como córregos perdidos, utilizando a recarga do dia anterior.	Simulou córregos e córregos perdedores, especificamente de altas condutividades do solo nos canais, e as dolinas foram simuladas como lagoas de alta condutividade hidráulica na parte inferior.	Perceberam que os canais principais encaminham o fluxo e os poluentes de uma sub-bacia para a seguinte.
6	Hou e Gao (2019)	O CN2 de 70% do escoamento total em pomares e florestas subterrâneas é o mais alto em florestas (628 mm). Dados observados foram utilizados para verificar o efeito simulado.	Os resultados sugerem que a precipitação média mensal simulada na estação Chang qiao Long coincide com os valores medidos relativamente durante o período de calibração, com E_{ns} de 0,82 e R^2 de 0,92.	Utilizaram Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e GWR, com base na fragmentação do uso do solo, para identificar áreas com maior e menor valor agregado, relacionar com uso da terra e com a geração de escoamento na bacia.

N°	AUTOR	PROCESSAMENTO	SAÍDA DOS DADOS	SOLUÇÕES E PROBLEMAS
7	Jain et al. (2015)	O fluxo de base diário, fluxo e precipitação foram convertidos em percentuais para análise posterior. Foi calculada a média de evapotranspiração anual simulada de Arundo.	As simulações indicaram que a invasão de Arundo causou aumento significativo na absorção de água e redução do fluxo em comparação com gramíneas, que anteriormente dominavam as nascentes.	O Rio Nueces apresenta-se geomorfologicamente complexo, pois muda rapidamente de curso e os processos subjacentes não são bem compreendidos.
8	Malagò et al. (2016)	A calibração <i>step-wise</i> é um procedimento que permite calibrar os diferentes componentes do fluxo conforme os diferentes processos hidrológicos subjacentes a cada objetivo de calibração.	O modelo captou a hidrologia das áreas cársticas, permitindo uma melhor gestão e planejamento dos recursos hídricos sob a escassez.	É uma região que enfrenta um limitado suprimento de água e um aumento na demanda sazonal, especialmente durante o verão para usos agrícolas e turísticos.
9	Nikolaidis, Bouraoui e Bidoglio (2013)	Um modelo de fluxo cárstico modificado: reservatório superior e sistema de reservatório inferior.	Os resultados em vários aspectos da modelagem foram consistentes, corroborando com a hipótese da qualidade da água por meio do fator cárstico profundo atuando como diluidor, estendido com a quantificação do cárstico.	O SWAT foi modificado para simular a resposta hidrológica e química de sistemas cársticos e avaliar os impactos da gestão do uso da terra e mudanças climáticas, gerida de forma intensiva.
10	Palanisamy e Workman (2015)	O GW_DELAY de 31 dias foi reduzido para 7,5 dias para caracterizar o rápido tempo de resposta da topografia cárstica. O CN2 foi usado na simulação de escoamento diário, enquanto o algoritmo de infiltração <i>Green-Ampt</i> é usado para a simulação do escoamento subterrâneo.	Os componentes do fluxo cárstico foram incorporados no SWAT, chamado Karst SWAT que, foi capaz de reproduzir os hidrogramas observado melhor do que o SWAT em termos de fluxo de pico e volume de hidrograma de nascentes e de correntes.	Os sumidouros localizados no leito foram conceituados como orifícios, e o fluxo através desses orifícios foi modelado como uma função do diâmetro do escoadouro.
11	Palazón e Navas (2014)	Uma calibração hidrológica mensal prévia, e a validação do modelo foi baseada na história de depósito sedimentar do reservatório de Barasona.	O Karst SWAT foi capaz de reproduzir os hidrogramas observado melhor do que o SWAT em termos de pico de fluxo e hidrograma de volume.	Dados hidrográficos e radiométricos referentes a taxas de sedimentação USLE K e albedo. Foram utilizados dados dos estudos dos processos.
12	Salerno e Tartari (2009)	O uso do método estatístico W.A., que utilizou um pacote gratuito de software Matlab (WTC-R15), utilizado para construir o XWT a partir de dois CWT.	Simulou a hidrologia, levando em conta a variabilidade espacial dos dados espaciais por meio do SIG.	Uma abordagem conjunta de modelagem hidrológica de superfície para entender os componentes do fluxo de base da descarga fluvial em ambientes cársticos.
13	Spruill, Workman e Taraba (2000)	O fluxo superficial e do canal é medido usando o tempo estimado de concentração. As previsões das taxas de pico do escoamento ocorreram a partir de uma modificação racional na fórmula.	O componente de percolação usa o roteamento para prever o fluxo através da camada do solo até o aquífero.	Minimização do desvio absoluto médio entre vazões observadas e simuladas identificaram valores/intervalos ótimos para cada parâmetro.
14	Sullivan e Gao (2017)	Simulação de descargas do sumidouro e dos fluxos dos rios, assim como poluentes foram medidos diretamente nas concentrações de coliformes fecais.	Os resultados da validação mostram que o método P3 (Probabilidade, Proteção e Precipitação) estima mais de perto a vulnerabilidade do aquífero e o RII (índice de intensidade de risco)	O RII não contabiliza todos os recursos cársticos devido a falsos positivos das características cársticas. O método COP-DEM, superestima a vulnerabilidade. O método

N°	AUTOR	PROCESSAMENTO	SAÍDA DOS DADOS	SOLUÇÕES E PROBLEMAS
			minimiza o viés exploratório. Por outro lado, o método COP (de concentração de fluxo em camadas sobrepostas) usa as características cársticas conhecidas subestimando a vulnerabilidade.	P3 é adequado para todos os aquíferos cársticos e oferece melhorias em relação a metodologias existentes de mapeamento de vulnerabilidades.
15	Tian et al. (2016)	Utilizaram dados do escoamento, NDVI e sedimento para medir as trocas entre os serviços ecossistêmicos. O SWAT foi adequado e utilizado o SWATCUP para o processamento.	O aumento do rendimento de água pode acumular a quantidade de erosão do solo. O rendimento de água e o rendimento de sedimentos em 2000 e 2010 estão em uma relação sinérgica.	Aplicaram com sucesso o SWAT para estimar a produção de água e solo. No entanto, a precisão variou de acordo com a estação; maior na estação seca e menor na estação chuvosa.
16	Vale e Holman (2009)	Simulações revelam que três dos quatro corpos de água ligados perdem água significativa para o aquífero subjacente.	O balanço hídrico simulado demonstra que a bacia é dominada por evapotranspiração, fluxo superficial do sistema lacustre para o mar e descarga de águas subterrâneas costeiras, sendo com menor importância: evaporação e captação do lago.	A descarga de águas subterrâneas costeiras tem origem tanto no vazamento dos lagos quanto em caminhos de fluxo de águas subterrâneas em larga escala, anteriormente não reconhecidos, no aquífero de calcário.
17	Vigiak et al. (2017)	Após a calibração hidrológica, a erosão bruta da encosta e os rendimentos dos sedimentos foram amplamente calibrados usando dados auxiliares.	A gestão de sedimentos é uma preocupação prévia na bacia do Danúbio para a prestação de serviços econômicos e ambientais.	A erosão de barrancos, os deslizamentos de terra e os processos de erosão de geleiras não puderam ser incluídos.
18	Wang e Brubaker (2014)	O ISWAT não linear teve melhor desempenho na estimativa da vazão, sobretudo durante a recessão do baixo fluxo, com períodos de baixo fluxo. Isso indicou que o algoritmo não linear pode representar melhor o conduto da água subterrânea.	O parâmetro ESTimation (PEST) foi acoplado ao ISWAT para autocalibrar os valores dos parâmetros não lineares. Um total de 10 anos de registro em 15 medidores de fluxo foi usado para calibrar o modelo.	Hidrogramas de ISWAT-L e ISWAT-N foram utilizados. Um período de aquecimento de 2 anos foi aplicado. A abordagem ISWAT-PEST acoplada pode ser usada na simulação de vazão futura.
19	Williams et al. (2014)	O modelo foi parametrizado inicialmente com base nos dados de fluxo contínuo e dos nutrientes. As saídas do modelo foram usadas como entradas para os períodos em que os valores medidos não estão disponíveis.	As concentrações de nutrientes nos fluxos dos tributários que drenam vários usos da terra não foram significativamente diferentes ($\alpha \pm 0,05$, com nível de confiança de 95%) para a maioria dos locais.	Originalmente, o modelo foi parametrizado com base nos dados de fluxo contínuo e nutrientes registrados na área da bacia. O balanço hídrico indicou um tempo de permanência que varia de seis a nove semanas.

Fonte - Os autores (2022).

O SWAT pode ser utilizado para vários tipos de aplicações e em diferentes tipos de terrenos ou ambientes geológicos, envolvendo diversos aspectos físico-naturais e na inclusão das atividades antrópicas, possibilitando assim auxiliar na gestão de recursos naturais. No contexto de Brasil, o estudo de Dantas (2016) investigou o processo hidrossedimentológico na bacia do Rio Taperoá, no Estado da Paraíba, para identificar boas práticas de manejo para uma melhor gestão agrícola.

No contexto de análise de desempenho do modelo, o estudo de Dantas (2016) aponta que, no caso da vazão, também se identificou uma variação significativa em comparação aos dois períodos analisados. No primeiro período, a vazão média registrada no posto fluviométrico era de 6,56 m³/s. No segundo período, passou a ser de 3,48 m³/s, ou seja, uma diminuição de 53%. O SWAT também seguiu essa tendência e estimou uma vazão média observada para o primeiro período igual a 8,39 m³/s, passando para 3,67 m³/s no segundo período. Contudo, o modelo apresentou um ajuste muito bom para o primeiro período NSE (NASH e SUTCLIFFE, 1970), com NSE=0,81 e R²=0,83, e bom para o segundo período (NSE=0,70 e R²=0,70). Também foi visto que, em escala espacial, algumas sub-bacias passaram a apresentar menores valores de vazão no segundo período em relação ao primeiro período, sendo que as sub-bacias que compreendem o curso do rio principal, o Rio Taperoá, demonstram as maiores taxas de vazão na bacia em ambos os períodos analisados.

Alguns trabalhos empregaram o modelo SWAT no Cerrado, com destaque para: Lima et al. (2013), Santos (2016) e Simões (2019). Santos (2016) analisou a produção da carga líquida na bacia do Ribeirão do Gama, em Brasília/DF. Lima et al. (2013) desenvolveram uma base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em bacias do bioma Cerrado. Nos períodos de calibração e validação no SWAT, Santos (2016) empregou referências estatísticas quantitativas, nas quais os indicadores foram Nash-Sutcliffe (NSE) e R², recomendadas também por Malagò et al. (2016), Amin et al. (2017) e Amin et al. (2018) para avaliar diversos modelos de quantificação sistemática da acurácia em simulações de bacias hidrográficas. Por sua vez, Simões (2019) realizou uma modelagem hidrossedimentológica da bacia do Rio Indaiá, Alto São Francisco/MG, onde utilizou dados do Projeto MapBiomias na categoria de uso da terra, entre outros. O mesmo autor faz alertas em sua pesquisa, pois é necessário considerar a possibilidade de que a classe “Pastagem” esteja superestimada, pois desconfia de que essa classe, muitas vezes, se confunde com a classe “Agricultura” e que a classe de “Culturas Anuais” foi subestimada.

Amatya, Jha e Edwards (2011), Palazón e Navas (2014) e Williams et al. (2014) utilizaram os produtos da topografia e/ou batimetria para execução no modelo, o delineamento das bacias, sub-bacias, rios, córregos e mudança no armazenamento do RE, computados usando um levantamento batimétrico, onde identificaram os divisores topográficos de contribuição hídrica pelo fornecimento dos dados existentes. Amatya, Jha e Edwards (2011), Palazón e Navas (2014) trabalharam: percolação profunda, escoamento de base (água subterrânea), fluxos perdidos, condutividade saturada e TMDL. Por sua vez, Williams et al. (2014) trabalharam com: fluxo subsuperficial, sumidouros, Coeficiente de Escoamento (ROC); balanço hídrico; fósforo e nitrogênio.

Referente aos ajustes nos dados de chuva e retirada dos picos, Amatya et al. (2011) apresentou hidrogramas dos fluxos mensais previstos principalmente para SL1 e SL2, separados por todos os dados incluídos e os picos excluídos em outubro de 2008, com eventos de alto fluxo. Os fluxos mensais medidos e os previstos para o período de agosto de 2008 a outubro de 2009 na sub-bacia SL1 obtiveram uma eficiência do modelo NSE e predição R² de 0,43 e 0,26, respectivamente, além de um R² do ROC anual e sazonal simulado entre 0,04 e 0,14. Os dados medidos foram superiores aos dados medidos entre 0,4 e 0,06, evidenciando uma superestimação do modelo. Contudo, ficaram subestimados na sub-bacia SL2, com o viés PBIAS e R² de 0,37 e -2,55. Amatya et al. (2011) acreditam que o fraco desempenho do modelo na previsão de fluxos mensais nos locais SL1 e SL2 foi provavelmente devido a potenciais caminhos de fluxos através do carste e a interação com os níveis de água do lago a jusante. Isso indica que o modelo SWAT, elaborado principalmente para prever fluxos de águas superficiais, foi incapaz de prever com exatidão as vazões dos fluxos mensais subterrâneos.

Os ROCs previstos, NSE e R² variaram entre 0,07 e 0,10 em comparação com o intervalo medido de 0,06 a 0,07 nesse local. Os autores acima mencionados concluíram que o modelo subestimou os fluxos

durante o aumento dos níveis dos lagos, provavelmente devido à alta condutividade e também a um coeficiente de percolação profundo, representado por um fluxo perdido em águas subterrâneas rasas e profundas. Os resultados indicaram que usar um valor médio medido é tão preciso quanto usar previsões do modelo para o fluxo mensal.

O modelo conseguiu simular com precisão dados de saída da bacia por médias mensais. Os resultados demonstraram a influência substancial das características cársticas no balanço hídrico. O R^2 do ROC medido e previsto variou entre 0,22 e 0,25, indicando uma concordância das previsões com os dados medidos. Remataram que esses valores de ROC são três a quatro vezes maiores que os observados para as sub-bacias SL1 e SL2 (AMATYA; JHA; EDWARDS, 2011).

Baffaut e Benson (2009) investigaram o desempenho do SWAT, de modelo semi-distribuído, na simulação de sumidouros, córregos perdidos e nascentes, tendo em vista bons resultados na modelagem do fluxo de cargas de poluentes dos riachos, assim como no escoamento superficial, fluxo de retorno do lençol freático e pela infiltração do fluxo de retorno em conduítes maiores. O modelo foi calibrado e validado para coliformes fecais e fósforo visando a testar a validade das intuições. Quanto aos indicadores de calibração e validação do fluxo, os valores NSE e R^2 , calculados do fluxo mensal nas estações observadas, variaram em torno de 0,24 a 0,56.

Salerno e Tartari (2009) testaram um método de simulação hídrica no carste, usando a W.A. e a variabilidade espacial dos dados de clima, solos, topografia e vegetação para compreender os componentes do fluxo de base da descarga de sumidouros no rio, proveniente dos condutos cársticos, conforme dados do equilíbrio hidrológico, obtido pelo balanço hídrico. Essa categoria de estudo fornece relações úteis na modelagem de chuva-vazão, correlações que acontecem nos atrasos temporais entre precipitação, escoamento e condutividade hidráulica. A aplicação em hidrologia do método W.A. foi útil para entender a descarga de sumidouros e dos fluxos, assim como das relações entre o tempo de circulação das chuvas para as águas subterrâneas e destas para os rios, que variaram conforme as estações e de ano para ano (SALERNO e TARTARI, 2009).

Em Spruill, Workman e Taraba (2000), as nascentes foram estimadas como fontes pontuais. As dolinas foram simuladas como lagoas de alta condutividade hidráulica na parte inferior. Os autores concluíram que as mudanças nos valores do CN2 na descarga do fluxo nos SWRRB e CREAMS do SWAT, citadas no **Quadro 6**, melhoraram o particionamento entre o fluxo de superfície e o de retorno. Por sua vez, a contribuição do fluxo total de águas subterrâneas é simulada pelo roteamento do componente de armazenamento do aquífero raso para descarga no córrego. Como tinha pouca informação disponível sobre a sensibilidade do modelo para várias entradas, um procedimento de análise/calibração e sensibilidade foi projetado para avaliar parâmetros pensados para influenciar previsões de descarga de fluxo (SPRUILL, WORKMAN e TARABA, 2000).

As sensibilidades dos parâmetros de Spruill, Workman e Taraba (2000) foram determinadas modelando fluxos diários (vazão) por um período de 2 anos. O desvio absoluto médio entre vazões diárias observadas e simuladas foi minimizado, identificando valores/intervalos ótimos para cada parâmetro, para alcançar o R^2 diário para 0,15, idêntico ao valor diário de 1996 de R^2 . Os valores de NSE e R^2 foram -0,04 e 0,19 para 1995 e 1996, respectivamente. O NSE e o R^2 para fluxos totais mensais foram de 0,58 para 1995 e 0,89 para 1996, semelhantes aos valores encontrados na literatura.

A intenção é mostrar no Quadro 6 como os pesquisadores aplicaram o “SWAT na rocha calcária”, para poder identificar a capacidade de simulação do comportamento da carga hidrossedimentar na bacia, assim como compreender os impactos ocasionados no uso e manejo da terra, que influenciam tanto nos riscos de erosão quanto nos processos hidrológicos, em qualidade e quantidade de água, favorecendo na previsão de possíveis alterações que tendem a ocorrer na superfície terrestre.

Quadro 6 - Síntese dos trabalhos pesquisados sobre SWAT e as adaptações para o relevo cárstico.

Nº	REFs.	PROCESSO	MÉTODO
1	Afinowicz, Munster e Wilcox (2005)	H	Aumentaram o código do fluxo de base no SWAT para simular a operação rápida do movimento de recarga do aquífero raso até o armazenamento profundo devido à topografia, para permitir correspondência nas vazões medidas com os fluxos de base simulados. O modelo foi configurado para a avaliação hidrológica e foi calibrado e verificado usando dados de fluxo medidos.
2	Amatya et al. (2011)	H	Teve levantamento batimétrico, extração de dados do LiDAR e dados de curva de nível a jusante do lago. Mapas de uso, da base USGS 1:24.000, no código SWAT e topográficos. Fotografia aérea com resolução de 1m. <i>Database</i> SSURGO em <i>shapefile</i> e a base de dados para o mapa SC-075 de solo. Locaram uma fonte no ponto de subsuperfície e mudaram a estimativa do escoamento de base.
3	Amin et al. (2017)	H, S	Concentrações de sedimentos sazonais, N, P e oxigênio dissolvido no córrego durante 1972-2005 e concentrações sazonais de N-nitrato no córrego durante 1999-2013. Integraram o SWAT ao TOPO-SWAT e utilizaram o SWATCUP na verificação.
4	Amin et al. (2018)	H, S	O modelo Topo-SWAT foi calibrado e validado em relação ao fluxo de vazão observado, e qualidade da água pela USGS. Os dados de culturas foram derivados dos dados de terras agrícolas (CDL) da USDA-NASS. As informações necessárias para desenvolver os cenários foram coletadas do projeto <i>NESARE Dairy Cropping Systems</i> e do <i>Penn State Agronomy Guide</i> , Serviço Nacional de Estatísticas Agrícolas e especialistas em agricultura local. Um processo de calibração em duas etapas foi realizado, dos dados de fluxo limitado, níveis de água subterrânea e níveis do lago.
5	Baffaut e Benson (2009)	H	Dados de solos a partir do banco de dados do Serviço de Conservação de Recursos Naturais (NTSR) <i>State Geographic</i> (STATSGO). Uso da terra extraído de imagens satélite de 1991 e 1993. Modificaram as equações de recarga das águas profundas, dividindo o fluxo de recarga da umidade do solo para evitar perdas de fluxo. Aumentaram a condutividade hidráulica de sumidouros, que foram simulados como lagoas e perdas de fluxo no SWAT B & B.
6	Hou e Gao (2019)	H	O NDVI foi dividido em três classes: <0.5, 0.5–0.7 e > 0.7. Pesquisaram a maior capacidade de retenção de água do ecossistema florestal conforme característica geológica de infiltração na região, e na combinação das categorias de cobertura e topografia. Observaram a variabilidade espacial do escoamento total superficial/subterrâneo com os métodos de análise do gradiente de regressão local.
7	Jain et al. (2015)	H	A espécie Arundo não existe como uma opção de cultura no banco de dados do SWAT. Valores de parâmetros para cana-de-açúcar foram ajustados para Arundo com base em observações disponíveis no modelo ALMANAC, sobre desenvolvimento da área foliar e produção de matéria seca de Arundo.
8	Malagò et al. (2016)	H, S	Buscaram quantificar o fluxo cárstico incluindo picos e o escoamento de base. Os pontos de nascentes foram calibrados manualmente, já que os sumidouros modificaram a descarga já calibrada (KSWAT), o balanço hídrico e as condições hidrológicas espaciais e temporais foram explicitados na geomorfologia, em particular, a condutividade hidráulica efetiva no canal principal. A região é dominada pelos

Nº	REFs.	PROCESSO	MÉTODO
9	Nikolaidis, Bouraoui e Bidoglio (2013)	H	calcários e enfrenta um limitado suprimento de água e um aumento na demanda sazonal, especialmente durante o verão, para usos agrícolas e turísticos Trabalharam a descarga de aquífero. Alteraram o fluxo de retorno cárstico, perdas de fluxo e dreno dos sumidouros, calculando o RESup e REInf disposto por camadas. O modelo de um RE ligado ao SWAT simulou o comportamento do carste.
10	Palanisamy e Workman (2015)	H	O uso da terra do projeto europeu CLC e modificados os tipos de solo (FAO). Algoritmo de soma roteamento e agregado (SSRA). Calcularam o fluxo para modelagem de sumidouros.
11	Salerno e Tartari (2009)	H	Mapa pedológico (1:50.000), DEM/inclinação, carta litológica extraída da carta geoambiental 1:10.000. Uso, precipitação e temperatura derivou o B.H. Realizaram uma abordagem combinada de modelagem hidrológica superficial e a estatística W.A., para entender a descarga de sumidouros de um rio, descreveram a variabilidade dos fluxos ligados às relações da variabilidade climática para as águas subterrâneas, que variaram conforme as estações e de ano para ano. A W.A. utilizou um pacote gratuito de <i>software Matlab</i> (WTC-R15).
12	Spruill, Workman e Taraba (2000)	H, S	Utilizaram parâmetros de descarga do fluxo na SWRRB + CREAMS do SWAT. Baixaram valores do CN2 para computar a maior infiltração em solos cársticos.
13	Sullivan e Gao (2017)	H	O método P3 é proposto como uma nova metodologia de avaliação de vulnerabilidade cárstica, minimizando o viés exploratório, utilizando a probabilidade e uma árvore de decisão no solo cárstico. Geração de mapas de vulnerabilidade e risco em nitrato. DEM de resolução de 1 m do LiDAR,
14	Tian et al. (2016)	H, S	Integraram o modelo CASA e o SWAT para quantificar os serviços ecossistêmicos.
15	Vale e Holman (2009)	H	Para encaixar/melhorar o ajuste dos limiares de recessão do fluxo satisfatoriamente nos hidrogramas, foi realizada: a) uma redução para 0,020 dias no parâmetro ALPHA_BF. O RCHRG_DP e o GW_REVAP foram acrescidos para 0,55 nas sub-bacias calcíferas ao norte e 0,20 respectivamente para cobrir as camadas do solo, particularmente dentro das áreas significativas de floresta úmida.
16	Vigiak et al. (2017)	H, S	A erosão bruta da encosta e os rendimentos dos sedimentos foram calibrados usando dados auxiliares (medições em pequenas parcelas das bacias hidrográficas e mapas de erosão nacionais e europeus).
17	Wang e Brubaker (2014)	H	Propuseram uma modificação não linear do valor de recessão em águas subterrâneas no SWAT (iSWAT) otimizando a recessão e a simulação de baixo fluxo.
18	Williams et al. (2014)	H	Usaram DEM da estação de monitoramento SC DHEC (SC-014). Amostragem do fluxo baseado em Doppler (ISC500 41, Lincoln, NE). Avaliaram cargas poluentes (T.N. e T.P.). Abordaram o balanço hídrico para estimar vazamentos verticais como componente residual do lago Magnólia, utilizando dados batimétricos.

(H) Hidrológico; (S) Sedimentar.

Fonte - Adaptado de Araújo e Figueiredo (2021, p. 79).

Wang e Brubaker (2014) modelaram a qualidade e a quantidade de água. Compararam dados de fluxo do modelo de reservatório linear (iSWAT-L) com o ISWAT adaptado (iSWAT-N). No SWAT original, o fluxo de água subterrânea é calculado usando um modelo de reservatório linear, com vazão

proporcional ao armazenamento. Na versão adaptada, um algoritmo de água subterrânea não linear foi introduzido no modelo original devido às características cársticas. Foi introduzido o parâmetro ESTmation (PEST) no modelo, para autocalibrar os valores dos parâmetros não lineares, resultando em uma melhor estimativa na vazão para a bacia. Neste estudo, os parâmetros das águas subterrâneas foram agrupados apenas pelo tipo de solo.

Referente à análise estatística, R^2 e NSE, Wang e Brubaker (2014) concluem que, no modelo iSWAT-L, os alcances de melhor desempenho foram o05e o06. Em Reach10, o NSE negativo sugeriu que as previsões do modelo não eram melhores do que a média das observadas. No modelo iSWAT-N, quase todas as estatísticas R^2 e NSE mostraram melhorias nos alcances 08 e 10, respectivamente. Embora algumas diferenças nas estatísticas fossem pequenas, as melhorias ainda eram observáveis. A Tabela 1 mostra o R^2 e o NSE para cada alcance nas duas versões do modelo. Os hidrogramas mostraram melhor estimativa em escoamento de base (fluxo na água subterrânea) e de recessão. Isso indica que o algoritmo da água subterrânea não linear é uma melhor representação do comportamento da água subterrânea.

Tabela 1 - Estatísticas de comparação de erros médios e adequação para cada alcance em ISWAT-L e ISWAT-N.

Alcance n°.	Média obs. (Y)	R^2		NSE		Erro médio (e)		Erro relativo (e=Y)	
		i-L	i-N	i-L	i-N	i-L	i-N	i-L	i-N
01	45,20	0,6354	0,6590	0,5062	0,5185	11,27	9,69	0,25	0,21
04	11,32	0,6155	0,6293	0,5748	0,5859	0,40	0,65	0,04	0,06
05	40,87	0,6881	0,7049	0,6663	0,6845	2,77	1,72	0,07	0,04
06	29,88	0,7143	0,7303	0,6678	0,6779	5,08	4,26	0,17	0,14
07	9,11	0,6619	0,6872	0,3450	0,3504	3,76	3,50	0,41	0,38
10	2,20	0,1979	0,1909	0,0791	0,0647	0,05	0,10	0,02	0,04
11	7,29	0,5237	0,5175	0,4950	0,4696	0,15	0,09	0,02	0,01
12	4,43	0,4930	0,4821	0,4546	0,4179	0,39	0,21	0,09	0,05
13	2,91	0,3777	0,3675	0,2755	0,2591	-0,56	0,53	0,19	0,18
15	18,19	0,5662	0,5782	0,4471	0,4690	2,82	1,81	0,16	0,10
18	2,26	0,5024	0,4969	0,4524	0,4471	0,36	0,37	0,16	0,16
19	5,60	0,4243	0,4219	0,3447	0,3357	1,05	1,10	0,19	0,20
21	1,09	0,4299	0,4390	0,4072	0,4205	0,10	0,08	0,09	0,08
22	2,17	0,5589	0,5585	0,5226	0,5303	0,34	0,14	0,16	0,07
24	83,79	0,5450	0,5712	0,4295	0,4578	8,59	4,41	0,10	0,05
Geral	18,52	0,6800	0,6841	0,5045	0,5252	2,50	1,81	0,13	0,10

Fonte - Wang e Brubaker (2014, p. 3.397).

ALGUNS PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS DO MODELO NO CARSTE

Com as orientações em torno da aplicabilidade do SWAT, buscou-se refletir sobre a finalidade desse modelo no carste e sua importância, além de identificar como os autores mencionados no registro do levantamento da pesquisa CAPES (BRASIL, 2019) trabalharam os materiais e métodos empregados. Então, foram selecionados alguns estudos e aprofundados de acordo com a temática escolhida.

No Quadro 7, são apresentados os resultados alcançados com uma prévia da pesquisa, sendo que, para uniformizar a ideia central da discussão, a análise estatística focou principalmente em valores do R^2 e do NSE, que, no geral, não foram tão elevados.

Quadro 7 - Resumo dos estudos relevantes em modelagem de bacias hidrográficas cársticas.

Nº	ESTUDO	PALAVRA-CHAVE	CÓDIGO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS	RESULTADO-CHAVE
1	Afinowicz, Munster e Wilcox (2005)	Gerenciamento de arbustos na provisão de água	GW_DELAY, ALPHA_BF, REVAPMN e RCHRG_DP	NSE=0,09 e -0,4
2	Amatya et al. (2011)	Percolação profunda, fluxos perdidos, TMDL, condutividade saturada	ESCO, SURLAG, SOL_AWC, CH_K1, CH_K2, GW_DELAY, ALPHA_BF, Adição de fonte de ponto de subsuperfície (sumidouro) e modificação do método de estimativa de escoamento de base	NSE=0,29 e -0,91
3	Amin et al. (2017)	Gestão agrícola, qualidade da água, nutriente e sedimento	SURLAG, SOL_AWC, ALPHA_BF, CN2 e, ESCO	NSE=0,77 a 0,79
4	Baffaut e Benson (2009)	Fluxo e transporte de poluentes (coliformes fecais e fósforo), recarga e águas subterrâneas	O fluxo de retorno e a recarga do aquífero: gw_delay, rchrg_seep, rchrg_krst, krst_sleep, krst_delay, dividindo a recarga seca e de água, usando valores de alta condutividade hidráulica	NSE=0,24 e -0,56
5	Hou e Gao (2019)	Geração de escoamento, variação espacial, fatores de impacto	CN2, SOL_AWC, ALPHA_BF, GWQMN, CH_K2	NSE, R ² =acima de 0,64 e 0,78
6	Jain et al. (2015)	Arundo donax, espécies invasivas, aquífero cárstico, balanço hídrico; áreas ribeirinhas, cana gigante	CN2, SOL_AWC, ALPHA_BF, GW_DELAY, ESCO, CH_K2, GWQMN	NSE e R ² =0,79 e 0,76
7	Malagò et al. (2016)	Balanço hídrico e calibração multi-site	A1 Fração de entrada para o reservatório superior, a2 Fração do reservatório superior para abaixar, ALPHA_BF, ALPHA_BF_D, CH_K (1), CH_K (2), CN2, EPCO, ESCO, GW_DELAY	NSE e R ² =0,53 e 0,46
8	Nikolaidis, Bouraoui e Bidoglio (2013)	Processos geoquímicos e hidrológicos, alterações climáticas	K, as constantes de recessão para o reservatório inferior; a2, a fração de fluxo da descarga de reservatório superior que entra no reservatório inferior; a1, a fração cárstica com o reservatório superior; e K1, a recessão constante para o reservatório superior	NSE=0,62 PBIAS=-22,3
9	Palanisamy e Workman (2015)	Fluxos localizados em sumidouros e riachos, karst SWAT, roteamento de fluxo e recarga	CN2, REVAPMN, ALPHA_BF, GW_DELAY O modelo adaptado para sumidouros que drenam para nascentes. Componentes de luxo, GW_REVAP	NSE=0,57 -0,87
10	Salerno e Tartari (2009)	Componente do fluxo de base e análise W.A.	CN2, K2, LAT_TIME, GW_DELAY	NSE=0,56 e -0,66
11	Spruill, Workman e Taraba (2000)	Escoamento, qualidade de água	ALPHA_BF, combinações de capacidade de água disponíveis, condutividade hidráulica do canal (Ch_K), comprimento do canal (CL)	NSE e R ² =0,04 e 0,19
12	Tian et al. (2016)	Modelo CASA, erosão do solo, trocas de serviços ecossistêmicos	Utilizaram SWAT e CASA para: escoamento, produção de água e sedimento, relações de compensação e sinérgicas da NPP.	NSE > 0,5 e R ² > 0,6
13	Vale e Holman (2009)	Lagos rasos, balanço hídrico	CN2, ALPHA_BF, RCHRG_DP e GW_REVAP	NSE entre 0,67 a 0,74
14	Vigiak et al. (2017)	Rendimento de sedimentos,	O procedimento de calibração foi testado e revisado a partir da consulta à	NSE > 0,50

Nº	ESTUDO	PALAVRA-CHAVE	CÓDIGO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS	RESULTADO-CHAVE
		concentração de sedimentos suspensos	literatura, reconsiderando as regras da parametrização	
15	Wang e Brubaker (2014)	PEST, algoritmo não linear	ESCO, EPCO, SL_SOIL, CANMX, GW_DELAY	R ² =0.6354 e 0.6590
16	Williams et al. (2014)	Fluxo superficial, sumidouro, ROC, balanço hídrico, fósforo, nitrogênio e TMDL	Avaliaram dados de cargas poluentes T.N. e T.P. e batimetria, o monitoramento incluiu o registro de chuvas, amostragem sazonal da qualidade da água, medições de vazão contínua de diferentes pontos da bacia.	Mais de 50% do T.P. e mais de 70% T.N.

Fonte - Os autores (2022).

Referente à abordagem analítica dos dados da RSL, foram utilizados como base os modelos que expõem como os autores anteriormente citados: a) resolveram questões de análise III, da Etapa 2 da pesquisa (Quadro 1); b) realizaram as etapas de processamento e simulações; c) análise estatística; e d) saída dos dados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Compreender os padrões preexistentes que incluem os diferentes métodos, tecnologias e aplicações norteadoras integradas envolvendo os termos “SWAT” e “Karst” é algo de suma importância atualmente, pois as possibilidades de diferentes aplicações nas mais variadas áreas de conhecimento permitem o desenvolvimento de projetos que favorecem o manejo sustentável do solo, assim como uma melhor qualidade de vida das pessoas. Com o registro do levantamento feito na plataforma *Web of Science*, portal CAPES (BRASIL, 2021), pode-se observar um crescimento em quantidade e qualidade do número de pesquisas. As diversas aplicações possíveis nas várias áreas de conhecimento permitem o desenvolvimento de projetos por práticas inteligentes, envolvendo modelagens hidrológicas, assim como mensurações sistemáticas.

A RSL favoreceu explicitar como outros países estão implementando seus estudos nessa área do conhecimento, voltadas às principais aplicações, técnicas utilizadas, integração dos dados, métodos de análises, bem como identificação de lacunas na pesquisa e o desempenho da modelagem dos processos hidrológicos e sedimentares no carste. A estrutura da RSL narrativa focou nas contribuições, métodos aplicados e resultados alcançados para o uso do SWAT no relevo cárstico, até quando estes não foram tão satisfatórios assim, demonstrando que a aceitabilidade do modelamento final é passível de maleabilidade. Diante dos fatos expostos, as ideias foram esquematizadas nos dados de entrada, processamento e de saída.

Neste artigo, foi exposta uma investigação parcial de 19 trabalhos divulgados na pesquisa *Web of Science* (BRASIL, 2019) entre 2000 e 2019 que foram mais significativos, evitando assim redundâncias com a inclusão de outros. No contexto dos critérios adotados na seleção dos estudos internacionais, focou-se no bom. As técnicas de sensoriamento remoto resultaram na produção de mapas ambientais para detecção da sensibilidade dos parâmetros e de variáveis, com vistas à concepção da modelagem.

A definição do ciclo hidrológico ocorreu após a inserção dos principais dados de entrada no modelo: solos, declividade e cobertura do solo, obtendo assim as HRUs. Ainda referente à coleta dos dados, as novas tecnologias avançam com a aplicação de dados batimétricos, radiométricos e do “doppler” para detecção de cotas do aquífero. Após adição dos dados das estações climatológicas e/ou fluviométricas, foram escolhidos parâmetros e variáveis mais influentes para a simulação do fluxo, que controlam processos hidrológicos superficiais e subterrâneos.

As informações das estações meteorológicas, climatológicas e/ou fluviométricas ajudaram a entender o comportamento do volume de água e sedimento no decorrer dos anos nas bacias hidrográficas. A representação de algumas variáveis do balanço hídrico bastante utilizada pelos autores aconteceu através de hidrogramas e histogramas.

A aplicação do SWAT nos sistemas cársticos em trabalhos futuros deverá ser precedida de informações fisiográficas da área, que são a base para estabelecer parâmetros e variáveis mais apropriadas e sensíveis no modelo. A criação de cenários também é um importante produto que, dependendo do objetivo, pode

muito bem ser empregada no SWAT para o carste. Os novos algoritmos com base na evolução das equações calculam os eventos mais influentes para estimar valores, visando ao planejamento, bem como auxiliar na tomada de decisão.

Apesar do volume de dados, muitos destes estudos contribuíram realizando ajustes nas equações e no modelo para aplicação na feição cárstica. A uniformização das escalas, *Datume* sistema de coordenadas no ambiente SIG, referentes aos dados de entrada, é necessária para o funcionamento do modelo. Os autores recomendam esclarecer dúvidas na literatura, bem como acesso a *sites* institucionais públicos, para adquirir os dados e conseguir apoio no manuseio pelos desenvolvedores do modelo.

Trata-se de um tema relevante para o curso de Geografia, em especial para as questões ambientais ligadas à compreensão da fisiologia das paisagens cársticas. A principal contribuição deste artigo é a revisão de literatura e das aplicações do SWAT no ambiente cárstico em língua portuguesa. A conquista da integração desses dois termos, geotecnologia e feição ambiental, têm um impacto significativo nos estudos relacionados aos processos hidrossedimentológicos no relevo cárstico, assim como às disciplinas das áreas concernentes à agronomia, engenharia civil, ambiental, hidrologia, geologia, pedologia, geografia, entre outras.

No entanto, como o SWAT foi desenvolvido originalmente para diferentes propósitos, vários desafios estão sendo encontrados para a integração e a aplicação na feição carste. O presente trabalho traz um balanço das atividades desenvolvidas no Programa de Pós-Graduação em Geografia (POSGEA) da Universidade de Brasília (UnB) no último triênio.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao POSGEA/UnB, ao Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) pelo apoio recebido e disponibilização dos laboratórios de Hidrogeologia (LAHIDROGEO) e Geoprocessamento (GEOPRO) e Geomática.

REFERÊNCIAS

AFINOWICZ, J. D.; MUNSTER, C. L.; WILCOX, B. P. Modeling effects of brush management on the rangeland water budget: Edwards Plateau, Texas. **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)**. v. 41. p. 181-193, 2005. Disponível em:

<http://agrilibecdn.tamu.edu/wilcox/files/2013/01/Afin.pdf> Acesso em: 11 jun. 2021.
<https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03727.x>

AMATYA, D. M. et al. SWAT-based streamflow and embayment modeling of karst-affected chapel branch watershed, South Carolina. **Transactions of the ASABE**. v. 54. p. 1311-1323, 2011. Disponível em: <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/38723> Acesso em: 11 jun. 2021.

<https://doi.org/10.13031/2013.39033>

AMIN, M. G. M. et al. Simulating hydrological and nonpoint source pollution processes in a karst watershed: A variable source area hydrology model evaluation. **Agricultural Water Management**. v. 180, p. 212-223. 2017. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377416302578> Acesso em: 11 jun. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.011>

AMIN, M. G. M. et al. Conservation dairy farming impact on water quality in a karst watershed in northeastern US. **Agricultural Systems**. v. 165, p. 187-196, 2018. DOI: [org/10.1016/j.agry.2018.06.010](https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.06.010) Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308521X17309782> Acesso em: 11 jun. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.06.010>

ARAÚJO, L.P.; FIGUEIREDO, V. S. (org). **Estado da arte das feições em carste no mundo: aplicação do SWAT e emprego das metodologias**. In: MARTINS, F. P; PEDROSO, L. B. Espaço Geográfico: diversidade temática e metodológica, Ituiutaba: Zion, Cap.5 p. 69-84. 2021. Disponível em: <http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/599505> Acesso em: 11 jun. 2021.
<https://doi.org/10.29327/535474.1-5>

ARAÚJO, L. P. et al. Estudo sistematizado das consequências da urbanização acelerada em torno da lagoa dos potiguares, Natal/RN. **Estudos Geográficos**: Revista eletrônica de geografia, Rio Claro, v.2, n.2, 2004. Disponível em:

<https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/estgeo/article/view/272> Acesso em: 15 jul. 2004.

BAFFAUT, C.; BENSON, V. W. Modeling flow and pollutant transport in a karst watershed with SWAT. **Transaction of the ASABE**, v.52, n.2, p. 469-79, 2009. DOI: 10.13031/2013.26840. Disponível em: <https://pubag.nal.usda.gov/download/30434/PDF> Acesso em: 11 jun. 2021. <https://doi.org/10.13031/2013.26840>

BRASIL. Ministério da Educação. Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - **Portal de Periódicos Capes**. Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.periodicos-capes.gov.br/ezi.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/lista-a-z-periodicos.htm> Acesso em: 11 jun. 2021.

DANTAS, J. C. **Processo hidrossedimentológicos na bacia do Rio Taperoá**. Orientador: Richarde Marques da Silva. 2016. 84p. Monografia (Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.13553.63848> Acesso em: 11 jun. 2021.

HOU W; GAO J. Simulating runoff generation and its spatial correlation with environmental factors in Sancha River Basin: The southern source of the Wujiang River. **Journal of Geographical Sciences**, v.29, p. 432-448, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11442-019-1608-z> Acesso em: 11 jun. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11442-019-1608-z>

JAIN, S. et al. Simulating the Hydrologic Impact of Arundo donax Invasion on the Headwaters of the Nueces River in Texas. **Hydrology**, v.2, n.3, p.134-147, 2015. DOI.org/10.3390/hydrology2030134. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2306-5338/2/3/134> Acesso em: 11 jun. 2021. <https://doi.org/10.3390/hydrology2030134>

LIMA, J. E.F.W. et al. Desenvolvimento de base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em bacia do bioma cerrado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20, 2013, Bento Gonçalves. **Anais [...]**. Bento Gonçalves: ABRH, 2013. p.1. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/155/689a9ee93417c2aea7c60871794c65fc_70db76e7713fe8dfa3f8d4c0fea75ccb.pdf Acesso em: 11 jun. 2021.

MALAGÒ, A. et al. Regional scale hydrologic modeling of a Carste-dominant geomorphology: the case study of the Island of Crete. **Journal of Hydrology**, v.540, p. 64-81, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.061> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169416303389> Acesso em: 11 jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.061>

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v.10, n.1, p. 282-290, 1970. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022169470902556> Acesso em: 11 jun. 2021. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and Water Assessment Tool**: theoretical documentation: version, 2009. Texas (USA): Texas &M University: Texas Agricultural Experiment Station, 2011. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf> Acesso em: 11 jun. 2021.

NIKOLAIDIS, N. P.; BOURAOUI, F.; BIDOGLIO, G. Hydrologic and geochemical modeling of a karstic Mediterranean watershed. **Journal of Hydrology**, Amsterdam. v.477, p. 129-138, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169412009821> Acesso em: 11 jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.018>

PALANISAMY, B.; WORKMAN, S. R. Hydrologic Modeling of Flow through Sinkholes Located in Streambeds of Cane Run Stream, Kentucky. **Journal of Hydrologic Engineering**. v.20, n.5, 2015. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0001060> Acesso em: 11 jun. 2021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001060](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001060)

PALAZÓN, L.; NAVAS, A. Modeling sediment sources and yields in a Pyrenean catchment draining to a large reservoir (Ésera River, Ebro Basin). **Journal of Soils and Sediments; Dordrecht**, v.14, p. 1612-1625, 2014. DOI:10.1007/s11368-014-0911-7. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816215301259> Acesso em: 11 jun. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0911-7>

SALERNO, F.; TARTARI, G. A coupled approach of surface hydrological modelling and Wavelet Analysis for understanding the baseflow components of river discharge in karst environments. **Journal of Hydrology**. v.376, n.1/2, p. 295-306, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.042>

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169409004429> Acesso em: 11 jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.042>

SANTOS, R. F. **Análise da produção da carga líquida na bacia do ribeirão do Gama-DF através do modelo SWAT**. 2016. 126p. Orientador: Rogério Elias Soares Uagoda. Dissertação (Mestrado em geografia) – Universidade de Brasília. Departamento de Geografia, Brasília, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/20891> Acesso em: 11 jun. 2021.

SIMÕES, K. **Modelagem hidrossedimentológica da bacia do Rio Indaiá, Alto São Francisco, MG, utilizando SWAT**. 2019. 144p. Orientador: Rejane Ennes Cicerelli. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas e Geodinâmica) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2019. Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/38686/1/2019_KauemSim%C3%B5es.pdf Acesso em: 11 jun. 2021.

SOUZA, E.L. et al. **Metodologia da pesquisa: aplicabilidade em trabalhos científicos na área da saúde**. 2. ed., rev. e ampl. Natal: EDUFRRN, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/27909>. Acesso em: 6 set. 2021.

SPRUILL, C.A.; WORKMAN, S.R.; TARABA, J.L. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. **Transactions of the ASABE**. v.43, n.6, p. 1431-9. 2000. Disponível em: DOI:<https://doi.org/10.13031/2013.3041> Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=3041> Acesso em: 11 jun. 2021.

SULLIVAN, T. P.; GAO, Y. Development of a new P3 (probability, protection, and precipitation) method for vulnerability, hazard, and risk intensity index assessments in karst watersheds. **Journal of Hydrology**. v.549, p.428-451, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169417302299> Acesso em: 11 jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.007>

Soil & Water Assessment Tool -SWAT. **Manual**. In: Software. Disponível em: <https://swat.tamu.edu/software/> Acesso em: 11 jun. 2021.

TIAN, Y. et al. Trade-offs among ecosystem services in a typical karst watershed, SW China. **Science of the Total Environment**. v.566, p.1297-1308, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969716311287> Acesso em: 11 jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.190>

VALE, M.; HOLMAN, I. P. Understanding the hydrological functioning of a shallow lake system within a coastal karstic aquifer in Wales, UK. **Journal of Hydrology**. v.376. p. 285–294. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169409004417> Acesso em: 11 jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.041>

VIGIAK, O. et al. Modelling sediment fluxes in the Danube River Basin with SWAT. **Science of the Total Environment**. v. 599. p. 992-1012, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717310884> Acesso em: 11 jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.236>

WANG, Y.; BRUBAKER, K. Implementing a nonlinear groundwater module in the soil and water assessment tool (SWAT). **Hydrological Processes**. v. 28. p. 3388-3403, 2014. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.9893> Acesso em: 11 jun. 2021. <https://doi.org/10.1002/hyp.9893>

WILLIAMS, T. M. et al. Streamflow and Nutrients from a Karst Watershed with a Downstream Embayment: Chapel Branch Creek. **Journal of Hydrologic Engineering**. v. 19. p. 428-438, 2014. Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000794](https://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000794). Acesso em: 11 jun. 2021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000794](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000794)

Recebido em: 05/04/2021

Aceito para publicação em: 10/02/2022