XVIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE
XVIII ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE

SIMULAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM BACIAS HIDROGRÁFICA COM MODELO SWAT: revisão bibliográfica

Dayana Karina Correa da Silva [1] *& Adilson Pinheiro* [2]

RESUMO – O Soil and Water Assessment Tool (SWAT) é um modelo hidrológico e de qualidade de água desenvolvido pelo USDA, que simula escoamento da água, erosão e a qualidade da água em bacias hidrográficas. Esse trabalho teve por objetivo apresentar uma revisão bibliográfica da adaptação do modelo SWAT para simulação de gases de efeito estufa (GEE). O modelo SWAT-DayCent integra em uma única estrutura processos hidrológicos e biogeoquímicos em escala de bacia hidrográfica, permitindo avaliar as interações entre água e carbono. O modelo SWAT-C simula processos terrestres como fotossíntese, respiração, decomposição e a mineralização e a ressuspensão de carbono nos sedimentos de fundo dos rios. No entanto, o SWAT ainda apresenta desafios para simulação de GEE em bacias tropicais.

ABSTRACT– The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) is a hydrological and water quality model developed by the USDA that simulates water runoff, erosion, and water quality in watersheds. This work aimed to present a literature review of the adaptation of the SWAT model for simulating greenhouse gases (GHG). The SWAT-DayCent model integrates hydrological and biogeochemical processes at the watershed scale into a single structure, allowing for the evaluation of water-carbon interactions. The SWAT-C model simulates terrestrial processes such as photosynthesis, respiration, decomposition, and the mineralization and resuspension of carbon in riverbed sediments. However, SWAT still presents challenges for simulating GHG in tropical basins.

Palavras-Chave – Mudanças climáticas; GEE.

[1]) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, fone 47 991643528, e-mail day.ambiental@gmail.com
[2]) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, fone 47 999617684, e-mail pinheiro2907@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é um modelo hidrológico e de qualidade de água desenvolvido pelo *USDA Agricultural Research Service* dos Estados Unidos e tem a finalidade de analisar os impactos decorrentes das alterações do uso e cobertura da terra, com abordagem no escoamento da água, erosão e a qualidade da água em bacias hidrográficas (FARIAS, 2025).

O SWAT tem se destacado como um modelo amplamente adotado nos últimos anos, com evidências de aplicação bem-sucedidas (BIEGER et al, 2019). O site oficial (https://www.card.iastate.edu/swat_articles/) mostra que foram publicados 6914 artigos sobre o modelo, sendo o primeiro em 1984.

Embora o SWAT tenha sido originalmente concebido como modelo hidrossedimentológico, suas aplicações têm se expandido progressivamente para simulações de processos biogeoquímicos, incluindo a estimativa de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Nesse contexto, submódulos específicos foram desenvolvidos para simulações dos fluxos do óxido nitroso (N_2O), o terceiro gás com maior potencial de aquecimento global (GWP), que no caso deste gás é 273, considerando o CO_2, que possui o GWP = 1 (GHIMIRE et al., 2020; YANG et al., 2017).

Esse trabalho tem por objetivo apresentar uma revisão bibliográfica da evolução do modelo SWAT para simulação de Gases de Efeito Estufa.

2. METODOLOGIA

A revisão iniciou-se com uma busca exploratória e abrangente no Google Acadêmico, utilizando combinações de termos como “SWAT model”, “Soil and Water Assessment Tool”, “hydrological modeling”, “SWAT sub-daily simulations” e “SWAT calibration and validation”. Essa etapa permitiu identificar artigos clássicos, publicações recentes, documentos técnicos e trabalhos amplamente citados, posteriormente refinados por período, relevância e impacto. Na sequência, utilizou-se a plataforma Consensus, baseada em inteligência artificial, que possibilitou identificar tendências emergentes, temas consolidados e autores de referência, ampliando a compreensão sobre a evolução do modelo. Como complemento fundamental, consultou-se ainda a SWAT Literature Database (https://litdb.swat.tamu.edu/), principal repositório oficial do modelo, que reúne milhares de artigos revisados por pares. Essa base foi essencial para garantir a abrangência da busca, identificar

estudos específicos sobre atualizações estruturais e localizar documentos técnicos centrais para a comunidade científica do SWAT.

Todos os estudos identificados foram organizados, triados e avaliados utilizando-se o software Mendeley para remoção de duplicidades e categorização temática (hidrologia, calibração e validação, avanços metodológicos, aplicações específicas e módulo de carbono). Cada publicação foi examinada quanto à relevância, rigor metodológico e contribuição para o entendimento do funcionamento ou evolução do modelo. A seleção final resultou em um conjunto robusto de trabalhos fundamentais e estudos recentes que representam o estado da arte sobre o SWAT, seguindo as melhores práticas de revisões sistemáticas aplicadas às Geociências (Siddaway; Wood; Hedges, 2019).

Por fim, foram empregados alguns critérios para inclusão e exclusão dos materiais encontrados, dessa forma, foram incluídos: i) artigos revisados por pares; ii) aplicação do SWAT para GEE; iii) estudos em contexto tropical ou comparativo; iv) GEE em solos brasileiros, com ênfase na Mata Atlântica. No caso de exclusão, foram considerados excluídos: i) anais sem revisão; ii) uso do SWAT para hidrologia, sem considerar GEE; iii) estudos atmosféricos sem relação com o solo ou uso da terra.

3. RESULTADOS

3.1 SWAT E CARBONO - SWAT-DayCent

O modelo SWAT-DayCent foi desenvolvido por Wu et al. (2016) com o propósito de integrar, em uma única estrutura, processos hidrológicos e biogeoquímicos em escala de bacia hidrográfica. Ele combina o difundido modelo hidrológico distribuído SWAT (Soil and Water Assessment Tool) com o modelo biogeoquímico DayCent, versão em passo diário do modelo CENTURY. Na configuração acoplada, o SWAT atua como arcabouço principal, enquanto o DayCent é incorporado no nível das HRUs (Hydrologic Response Units), permitindo transferência de informações e conversão de formatos essenciais para a compatibilidade entre os modelos. Funções adicionais foram implementadas para ajustar a estrutura dos dados de solo às exigências do DayCent, possibilitando simulações integradas e consistentes. Assim, o SWAT-DayCent é capaz de representar simultaneamente componentes hidrológicos — como vazão, umidade do solo e evapotranspiração — e componentes biogeoquímicos — como produtividade primária líquida (NPP), SOC e respiração do solo —, permitindo avaliar de forma integrada as interações entre água e carbono. No DayCent, o

carbono orgânico do solo (SOC) é distribuído em três compartimentos: ativo, lento e passivo. O compartimento ativo engloba microrganismos e produtos microbianos de curta renovação; o lento inclui material vegetal mais resistente, com tempos de decomposição que variam de uma a várias décadas; e o passivo contém carbono estável química ou fisicamente, altamente resistente à decomposição, cuja dinâmica depende de fatores como umidade, temperatura e textura do solo (Parton et al., 1994).

Além disso, o modelo SWAT-C, diretamente relacionado ao SWAT-DayCent, representa uma evolução voltada à modelagem aprimorada do ciclo do carbono. Essa versão incorpora o módulo CENTURY para simular processos terrestres como fotossíntese, respiração, decomposição e impactos antrópicos, e foi recentemente expandida para incluir um módulo de diagênese sedimentar, capaz de representar a mineralização e a ressuspensão de carbono nos sedimentos de fundo dos rios. Essa incorporação possibilita simular fluxos bentônicos de carbono — uma parcela essencial das interações entre ecossistemas terrestres e aquáticos —, anteriormente ausentes nos modelos de bacia. Assim, enquanto o SWAT-DayCent enfatiza a integração de processos hidrológicos e biogeoquímicos terrestres ao nível das HRUs, o SWAT-C amplia esse escopo ao incluir processos aquáticos, fornecendo uma visão mais completa do ciclo do carbono desde o solo até os sedimentos. A compreensão das trocas de carbono entre ecossistemas terrestres e aquáticos é fundamental para a estimativa adequada do balanço global de carbono, embora ainda marcada por grandes incertezas relacionadas à exportação, ao depósito e ao degaseamento de carbono nos ambientes aquáticos (Qi et al., 2020). Modelos tradicionais de bacia tendem a simplificar esses processos, enquanto modelos avançados de qualidade da água exigem informações detalhadas dos processos terrestres para simular a biogeoquímica aquática (Chapra, Pelletier & Tao, 2003; Wool et al., 2006). Nesse contexto, o SWAT-C representa um avanço substancial ao incluir a decomposição da matéria orgânica, mineralização e transporte de carbono particulado e dissolvido (Zhang et al., 2013; Du et al., 2019), além de processos sedimentares bentônicos essenciais para compreender trocas de nutrientes, respiração sedimentar e eutrofização (Qi et al., 2020). Evidências de campo, como as observadas na Tuckahoe Watershed, indicam que grande parte do carbono depositado nos sedimentos é convertida em CO_2 e CH_4 e liberada para a coluna d'água, reforçando a importância da inclusão desses processos em modelos integrados de ciclo do carbono em bacias hidrográficas (Qi et al., 2020).

3.2. USO DA FERRAMENTA PARA EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

Os Gases de Efeito Estufa que tem origem edáfica, como o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), resultam de processos biogeoquímicos intimamente acoplados ao ciclo hidrológico do solo, conferindo ao SWAT um posicionamento singular entre as ferramentas de simulação disponíveis. A compreensão do comportamento desses gases no solo é condição prévia para entender de que forma o SWAT os representa em escala da bacia hidrográfica.

O óxido nitroso (N_2O) é o GEE de maior relevância no contexto da modelagem pelo SWAT, pois é produzido diretamente pelos processos de nitrificação e desnitrificação que o modelo simula internamente como parte do ciclo do nitrogênio (GHIMIRE et al., 2020).

A nitrificação, ou seja, a oxidação de NH_4^+ a NO_3^-, predomina em condições de solo mais aerado e produz N_2O como subproduto. A desnitrificação, processo inverso (redução de NO_3^- a N_2) domina em condições de anaerobiose e alta umidade, sendo a principal via global de produção de óxido nitroso (N_2O) (HAN et al., 2023).

A transição entre as duas vias ocorre em torno de 65% do espaço poroso preenchido por água e o pico das emissões de N_2O ocorre entre 80 e 95% do espaço poroso preenchido por água. Esses limites são as variáveis que o SWAT simula continuamente (umidade do solo por camada, temperatura e fluxo lateral de água), o que fundamenta sua escolha como ferramenta integradora entre hidrologia e emissões de gases (WANG et al., 2023).

Os fatores que controlam as emissões de N_2O no solo operam em múltiplas escalas e interagem de forma não linear. Tang et al. (2021) identificaram que o teor de nitrogênio do solo explica a varação das taxas de desnitrificação melhor que variáveis climáticas ou edáficas isoladas. A taxa de desnitrificação máxima em climas úmidos subtropicais, como o contexto do bioma Mata Atlântica, onde os valores médios superaram os de climas secos em mais de 300%.

Paralelamente, o pH do solo exerce papel primário no controle da razão entre o N_2O proveniente de nitrificação e desnitrificação em áreas agrícolas, parâmetro incorporado em módulos avançados do SWAT, como o SWAT-C (LIANG et al, 2023).

Em ambiente aquático, o N_2O produzido no solo é transportado e emitido por estes. Quick et al. (2019) identificaram que os processos de desnitrificação incompleta são globalmente dominante em ambientes lóticos, devido a concentrações elevadas de nitrato, condições de anoxia e carbono orgânico disponível. As emissões em ambiente lótico de N_2O se correlacionam positivamente com a concentração de nitrato e negativamente com o oxigênio dissolvido, sendo mais intensas em meses mais quentes e a noite.

O SWAT simula o transporte do nitrato da bacia para os cursos de água, permitindo que as emissões de óxido nitroso aquático sejam estimadas em função dos fluxos simulados de nitrogênio (QUICK et al., 2019).

Para o dióxido de carbono (CO_2), a interação com o SWAT ocorre via ciclo de carbono orgânico do solo e da respiração edáfica. Melaku et al. (2022) modificaram o SWAT para estimar a troca líquida de ecossistema e as emissões de CO_2 em zonas úmidas frias no Canadá, incorporando a dinâmica do lençol freático como modulador da respiração do solo. Os resultados demonstraram que o acoplamento entre os processos hidrológicos e biogeoquímicos simulados pelo SWAT é capaz de reproduzir com bom intervalo de confiança a variabilidade temporal das emissões de CO_2.

Em relação o metano (CH_4), a ausência de rotina consolidada no SWAT representa a principal lacuna atual para simular o comportamento entre os três GEE principais. Sua produção ocorre em condições anaeróbias, com microrganismos metanogênicos que utilizam como substrato o acetato e o dióxido de carbono que foram produzidos a partir da matéria orgânica do solo. A altura do lençol freático é o principal controlador da extensão das zonas anaeróbias no solo, e por consequência, a metanogênese. Apesar disso, o SWAT ainda não possui um módulo acoplado ao seu balanço hídrico e ou ciclo de carbono para contextos tropicais (BRIDGHAM et al., 2013).

A interação entre os GEE e o SWAT é, portanto, estrutural: os processos que geram os gases são os mesmos processos que o SWAT simula como parte do ciclo hidrológico e biogeoquímico da bacia. Isso confere ao modelo uma vantagem metodológica única, ou seja, não é necessário criar um modelo separado para os gases, mas sim expandir e calibrar as rotinas já existentes para que produzam estimativas de fluxo gasoso como produto derivado da simulação hidrológica contínua (GHIMIRE et al., 2020; GAO et al., 2019).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O SWAT se consolidou como modelo adequado para simular os GEE em escala da bacia, por razões estruturais que modelos estatísticos não replicam: a integração entre hidrologia, ciclo de nutrientes e processos biogeoquímicos geradores de gases, com representação do fluxo lateral de água no solo, o que se torna essencial para capturar a distribuição das zonas de nitrificação e desnitrificação em bacias úmidas (GHIMIRE et al., 2020).

Os módulos que simulam o óxido nitroso evoluíram de rotinas empíricas para configurações baseadas na física, como o SWAT-C, que são capazes de explicar aproximadamente 65% da

variabilidade anual das emissões. Para o CO_2, extensões do código SWAT incorporaram cinética microbiana e respiração do ecossistema em escala regional. O CH_4, contudo, permanece sem rotina consolidada, lacuna especialmente crítica para contextos tropicais com lençol freático raso e alta produtividade de matéria orgânica, como encontrados no bioma Mata Atlântica.

No contexto deste bioma, o SWAT demonstrou desempenho hidrológico em diversas situações e é o bioma que concentra maior número de estudos sobre o modelo publicados no Brasil nos últimos 5 anos (FERRAZ et al., 2024). Apesar disso, nenhum estudo identificou a integração da base hidrológica consolidada com módulos de GEE e nem utilizou dados empíricos de N_2O, CO_2 e CH_4 já disponíveis para solos do bioma como base de calibração. Essa é a lacuna central que este artigo documentou.

A crítica mais substantiva ao estado da arte não recai sobre a qualidade dos estudos existentes, mas sobre a segmentação estrutural que ainda persiste entre três comunidades que precisariam trabalhar de forma integrada: a comunidade de modelagem hidrológica (que aplica o SWAT, mas raramente adiciona módulos de GEE), a comunidade de biogeoquímica de solos tropicais (que mede fluxos de gases em campo, mas raramente em escala de bacia), e a comunidade de políticas climáticas (que demanda estimativas espacialmente explícitas de emissões, mas dispõe apenas de fatores de emissão genéricos do IPCC Tier 1).

Essa fragmentação tem consequências práticas. O inventário nacional de GEE do Brasil (SEEG/MCTI) utiliza metodologias que não capturam a variabilidade espacial intra-bacia das emissões e imprecisão afeta diretamente a credibilidade dos compromissos assumidos pelo Brasil no âmbito do Acordo de Paris e das Contribuições Nacionalmente Determinadas. A restauração florestal na Mata Atlântica avança como estratégia de mitigação, estudos indicam que florestas restauradas acumulam carbono progressivamente, mas solos em restauração ainda retêm legados de degradação agrícola nas camadas mais profundas (BIELUCZYK et al., 2023). Mas sem modelos que simulem as emissões de GEE por bacia hidrográfica, é impossível avaliar com precisão o balanço líquido de gases de cada projeto de restauração.

A longo prazo, SWAT calibrado para GEE na Mata Atlântica pode se tornar uma ferramenta de suporte à decisão em três frentes convergentes: i) no mercado de carbono regulado: a Lei 15.042/2024 criou o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões, e projetos de restauração florestal que precisem quantificar remoções de GEE com base fisicamente consistente encontrarão no SWAT uma ferramenta de cálculo auditável e espacialmente explícita — algo que fatores de emissão genéricos não oferecem; ii) na restauração orientada por dados: estudos demonstram que florestas restauradas na Mata Atlântica podem sequestrar 2,3 $GtCO_2$ ao longo de décadas (CROUZEILLES et

al., 2020), mas a eficiência desse sequestro depende de onde e como restaurar, e o SWAT pode indicar quais sub-bacias apresentam maior potencial de redução de emissões de N_2O e CH_4 associadas à conversão de pastagens em floresta nativa; iii) na adaptação às mudanças climáticas: projeções com cenários IPCC AR6 já demonstraram que bacias da Mata Atlântica podem enfrentar reduções de 76,6% nas vazões mínimas em cenários secos e quentes (COSTA et al., 2024).

Esses mesmos cenários afetam profundamente os processos de nitrificação e desnitrificação tornando o SWAT com submódulos de GEE calibrados a possibilidade de projetar como as emissões de gases responderão às mudanças climáticas previstas, fornecendo informação essencial para o planejamento territorial e para o cumprimento das metas climáticas brasileiras.

O SWAT não é uma ferramenta pronta para todos os desafios que a simulação de GEE em bacias tropicais coloca. É, antes, uma plataforma em evolução contínua, com uma arquitetura interna suficientemente flexível para receber as extensões que ainda faltam, com uma base de validação hidrológica na Mata Atlântica sólida o bastante para sustentar esses avanços.

REFERÊNCIAS

BIEGER, K. et al. (2019) Representing the connectivity of upland areas to floodplains and streams in SWAT+. Journal of the American Water Resources Association, v. 55, n. 3.

BIELUCZYK, W. et al. (2023) Linking above and belowground carbon sequestration, soil organic matter properties, and soil health in Brazilian Atlantic Forest restoration. Journal of Environmental Management, v. 344, p. 118504.

BRIDGHAM, S. D. et al. (2013) Methane emissions from wetlands: biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales. Global Change Biology, v. 19, n. 5, p. 1325–1346.

CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G. J.; TAO, H. (2003) QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality — Documentation and User's Manual. Version 2.04. Medford: Tufts University.

COSTA, D. A. et al. (2024) Water availability and extreme events under climate change scenarios in an experimental watershed of the Brazilian Atlantic Forest. Science of the Total Environment, v. 912, p. 168973.

CROUZEILLES, R. et al. (2020) Achieving cost-effective landscape-scale forest restoration through targeted natural regeneration. Conservation Letters, v. 13, n. 3, p. e12709.

DU, E. et al. (2019) Coupling hydrologic and biogeochemical processes to simulate dissolved organic carbon transport in a forested watershed. Journal of Hydrology, v. 573, p. 90–102.

FARIAS, L. N. et al. (2025) Hydrological assessment using the SWAT model in the Jundiaí River Basin, Brazil: calibration, model performance, and land use change impact analysis. Resources, v. 14, n. 1, p. 5.

FERRAZ, L. et al. (2024) Databases and applications of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model in Brazilian river basins: a review. Environmental Modeling & Assessment, v. 29, p. 1–18.

GAO, X. et al. (2019) SWAT-N_2O coupler: an integration tool for soil N_2O emission modeling. Environmental Modelling & Software, v. 119, p. 117–129.

GHIMIRE, U. et al. (2020) A review of ongoing advancements in Soil and Water Assessment Tool (SWAT) for nitrous oxide (N_2O) modeling. Atmosphere, v. 11, n. 10, p. 1058.

LIANG, K. et al. (2023) Simulated nitrous oxide emissions from multiple agroecosystems in the U.S. Corn Belt using the modified SWAT-C model. Environmental Pollution, v. 316, p. 120496.

MELAKU, N. et al. (2022) Modeling the dynamics of carbon dioxide emission and ecosystem exchange using a modified SWAT hydrologic model in cold wetlands. Water, v. 14, n. 7, p. 1037.

PARTON, W. J. et al. (1994) Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. Global Biogeochemical Cycles, v. 8, n. 4, p. 785–809.

QI, J. et al. (2020) Developing a benthic sediment diagenesis module and integrating it into a terrestrial-aquatic carbon cycling model SWAT-C. Carbon Balance and Management, v. 15, p. 13.

QUICK, A. et al. (2019) Nitrous oxide from streams and rivers: a review of primary biogeochemical pathways and environmental variables. Earth-Science Reviews, v. 191, p. 224–262.

SIDDAWAY, A. P.; WOOD, A. M.; HEDGES, L. V. (2019) How to do a systematic review. Annual Review of Psychology, v. 70, p. 747–770.

WANG, C. et al. (2023) N_2O emissions from two Austrian agricultural catchments simulated with an N_2O submodule developed for the SWAT model. Atmosphere, v. 12, n. 3, p. 371.

WOOL, T. A. et al. (2006) Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) — User's Manual. Version 2006. Washington, D.C.: U.S. EPA.

WU, Y. et al. (2016) SWAT-DayCent coupler: an integration tool for simultaneous hydro-biogeochemical modeling. Environmental Modelling & Software, v. 86, p. 81–90.

YANG, Q. et al. (2017) Enhancing the Soil and Water Assessment Tool model for simulating N_2O emissions of three agricultural systems. Ecosystem Health and Sustainability, v. 3, n. 2, p. e01223.

ZHANG, L. et al. (2013) Simulating watershed-scale dissolved organic carbon dynamics using a coupled hydrological-biogeochemical model. Journal of Hydrology, v. 498, p. 1–12.