

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Eliane Fischborn

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO MODELO SWAT PARA SIMULAÇÃO
DOS PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS, UTILIZANDO
DIFERENTES ABORDAGENS DE CALIBRAÇÃO**

Santa Maria, RS
2023

Eliane Fischborn

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO MODELO SWAT PARA SIMULAÇÃO DOS
PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS, UTILIZANDO DIFERENTES
ABORDAGENS DE CALIBRAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheira Sanitarista e Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Vanessa Sari

Santa Maria, RS
2023

Eliane Fischborn

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO MODELO SWAT PARA SIMULAÇÃO DOS
PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS, UTILIZANDO DIFERENTES
ABORDAGENS DE CALIBRAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Vanessa Sari, Dra. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)

Alexandre Swarowsky, Ph.D. (UFSM)

Debora Missio Bayer, Dra. (UFSM)

Santa Maria, RS
2023

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo a Deus pela vida e pela oportunidade de hoje estar aqui realizando um sonho, sem Ele nada disso seria possível.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Maria por seu ensino público, gratuito e de qualidade, o qual possibilita novos horizontes para mim e tantos outros. Agradeço pelas políticas de permanência e pelos programas e atividades ofertados.

Expresso meus sinceros e profundos agradecimentos à Prof^a. Dra. Vanessa Sari, pelo apoio, paciência e suporte prestado em todas as etapas deste trabalho. Agradeço por sua dedicação em ajudar-me a alcançar meu objetivo e por compartilhar seus conhecimentos e sabedoria. Sua orientação foi inestimável para a conclusão deste trabalho.

Agradeço ao Prof^o. Alexandre Swarowsky e à Prof^a. Debora Missio Bayer por aceitarem compor a banca examinadora, bem como pelas aulas e aprendizados transmitidos ao longo da graduação. Estendo meu agradecimento a todo o corpo docente do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da UFSM, com o qual tive o privilégio de aprender e conviver.

Quero expressar minha sincera gratidão aos meus pais, Rogério Fischborn e Dolores Fischborn, ao meu irmão, Roger Fischborn e a minha avó, Helga Voesch, por todo o amor, confiança e apoio incondicional que sempre me concederam. Agradeço, por sempre acreditarem em meu potencial e por nunca medirem esforços para me ajudar a chegar onde estou hoje. Esta conquista não é apenas minha, mas também é para vocês e devido a vocês. Obrigada por serem minha família e por sempre estarem ao meu lado.

Agradeço meu namorado, Bruno Rossi, que esteve presente em todos os momentos, oferecendo palavras de conforto, encorajamento e amor. Sua paciência, compreensão e apoio foram fundamentais para que eu pudesse concluir este trabalho.

Um agradecimento aos meus colegas e amigos, Gustavo Mamani, Kauani Moenke, Luise Röpke, Ricardo Martins, Vanessa Garcia e William Azevedo que sempre se fizeram presente desde o início da graduação e de nossa amizade. Obrigada pelos grandes momentos e também pelos mais banais, que se tornam especiais ao lado de vocês. Grata por compartilhar essa jornada.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para que eu chegasse até aqui. Sempre lembrarei de todos com muito carinho. Muito obrigada!

RESUMO

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO MODELO SWAT PARA SIMULAÇÃO DOS PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS, UTILIZANDO DIFERENTES ABORDAGENS DE CALIBRAÇÃO

AUTORA: Eliane Fischborn
ORIENTADORA: Profa. Dra. Vanessa Sari

A ação antrópica tem gerado uma série de consequências sobre o meio ambiente, as quais representam um grande desafio para os responsáveis pela gestão e pelo manejo das bacias hidrográficas. Uma das alternativas disponíveis para a investigação desses problemas é a modelagem dos processos hidrossedimentológicos e, entre os modelos atualmente disponíveis está o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), um modelo amplamente utilizado para estudos em bacias hidrográficas. Essa pesquisa investigou a eficiência do modelo SWAT para simulação dos processos hidrossedimentológicos na bacia hidrográfica do Taboão/RS, procurando identificar quais equações e métodos de evapotranspiração, propagação do escoamento e de transporte de sedimentos nos canais, disponíveis nas rotinas do modelo, melhor representam os processos presentes, considerando escala diária dos dados hidrossedimentológicos de saída do modelo e diferentes resoluções temporais dos dados de entrada de precipitação. Os dados empregados para a calibração da vazão abrangem os anos de 2013 (a partir de março), 2014 e 2016, enquanto os anos de 2011 e 2012 foram designados como período de aquecimento (warm up). A calibração da produção de sedimentos utilizou os anos de 2013 e 2015, com os anos de 2011 e 2012 também considerados para o aquecimento. No processo de validação, os dados de 2015 foram empregados para a estimação da vazão, e os anos de 2014 e 2016 foram utilizados para a produção de sedimentos. Foram analisados 27 parâmetros para a calibração da vazão, 22 parâmetros quando empregada a equação de Bagnold e 20 parâmetros quando utilizada a equação de Yang para o cálculo do transporte de sedimentos, degradação e aporte no canal. Os resultados da simulação da vazão, avaliados pelo coeficiente Nash-Sutcliffe (NS), indicaram valores de 0,66 e 0,33 para a calibração com os métodos GA e CN, respectivamente, nos melhores cenários. Na validação, esses valores foram de 0,76 e 0,44 para os métodos GA e CN, respectivamente. No que concerne à calibração da produção de sedimentos diária, o NS foi de 0,73 para os métodos GA e CN, enquanto na validação, esses valores foram de 0,64 e 0,48 para os métodos GA e CN, respectivamente. Os resultados das simulações enfatizam que a representação mais precisa da vazão e da produção diária de sedimentos na bacia do Taboão é alcançada ao incorporar dados horários de precipitação, o método de infiltração de Green & Ampt, a equação de evapotranspiração de Penman-Monteith, o método de propagação de escoamento de Variable Storage e o método de Bagnold para transporte de sedimentos no canal. A utilização conjunta desses métodos demonstrou os melhores desempenhos, evidenciando maior capacidade na previsão dos processos hidrossedimentológicos observados em bacias agrícolas de pequeno porte, como é o caso da bacia do Taboão, caracterizada pela predominância de escoamento subsuperficial e subterrâneo.

Palavras-chave: processos hidrossedimentológicos, simulação subdiária, modelo SWAT.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE SWAT MODEL FOR SIMULATION OF HYDROSEDIMENTOLOGICAL PROCESSES, USING DIFFERENT CALIBRATION APPROACHES

AUTHOR: Eliane Fischborn
ADVISOR: Profa. Dra. Vanessa Sari

Anthropogenic actions have led to various consequences for the environment, posing significant challenges for those responsible for managing and handling watersheds. One available approach for investigating these issues is the modeling of hydrosedimentological processes, with the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) being a widely used model for watershed studies. This research assessed the efficiency of the SWAT model in simulating hydrosedimentological processes in the Taboão/RS watershed. The goal was to identify which equations and methods for evapotranspiration, runoff propagation, and sediment transport in channels, available in the model routines, best represent the present processes. This consideration involved the daily scale of hydrosedimentological output data from the model and different temporal resolutions of precipitation input data. Calibration of flow utilized data from 2013 (from March onwards), 2014, and 2016, with 2011 and 2012 designated as the warm-up periods. Sediment production calibration used data from 2013 and 2015, with 2011 and 2012 also considered for warming up. In the validation process, 2015 data were employed for flow estimation, while 2014 and 2016 data were used for sediment production. A total of 27 parameters were analyzed for flow calibration, 22 for the Bagnold equation, and 20 for the Yang equation in sediment transport, degradation, and channel input calculation. Simulation results for flow, evaluated by the Nash-Sutcliffe coefficient (NS), indicated values of 0.66 and 0.33 for calibration using the GA and CN methods, respectively, in the best scenarios. In validation, these values were 0.76 and 0.44 for the GA and CN methods, respectively. Regarding daily sediment production calibration, the NS was 0.73 for both GA and CN methods, while in validation, these values were 0.64 and 0.48 for GA and CN methods, respectively. The simulation results underscore that the most accurate representation of flow and daily sediment production in the Taboão/RS watershed is achieved by incorporating hourly precipitation data, the Green & Ampt infiltration method, the Penman-Monteith evapotranspiration equation, the Variable Storage runoff propagation method, and the Bagnold sediment transport method. The combined use of these methods demonstrated superior performance, showcasing greater predictive capability for observed hydrosedimentological processes in small agricultural watersheds, such as the Taboão watershed, characterized by the prevalence of subsurface and underground runoff.

Keywords: hydrosedimentological processes, subdaily simulation, SWAT model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estágios do Ciclo Hidrológico	20
Figura 2 - Zona saturada e não-saturada do solo	21
Figura 3 - Localização da bacia do Taboão e identificação dos pontos de monitoramento	38
Figura 4 - Mapa de uso do solo da bacia do Taboão/RS	41
Figura 5 - Mapa pedológico da bacia do Taboão/RS	42
Figura 6 - Mapa altimétrico da bacia do Taboão	43
Figura 7 - Curva-chave para determinação da vazão em função da variação do nível de água, na bacia do Taboão	45
Figura 8 – Calibração da vazão diária no modelo SWAT: a) Variação da vazão diária observada e simulada na bacia do Taboão ao longo do tempo; b) Erro na estimativa da vazão diária em relação à vazão observada e; c) Ajuste entre vazão diária observada e simulada na bacia no Taboão; considerando uso do método de infiltração da Curva Número, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith e método de propagação de escoamento <i>Variable Storage</i> (cenários 1 e 5).	64
Figura 9 – Calibração da vazão diária no modelo SWAT: a) Variação da vazão diária observada e simulada na bacia do Taboão ao longo do tempo; b) Erro na estimativa da vazão diária em relação à vazão observada e; c) Ajuste entre vazão diária observada e simulada na bacia no Taboão; considerando uso do método de infiltração de Green & Ampt, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith e método de propagação de escoamento <i>Variable Storage</i> (cenários 9 e 13).	65
Figura 10 - Validação da vazão diária no modelo SWAT: a) Variação da vazão diária observada e simulada na bacia do Taboão ao longo do tempo; b) Erro na estimativa da vazão diária em relação à vazão observada e; c) Ajuste entre vazão diária observada e simulada na bacia no Taboão; considerando uso do método de infiltração da Curva Número, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith e método de propagação de escoamento <i>Variable Storage</i> (cenários 1 e 5).	68
Figura 11 – Validação da vazão diária no modelo SWAT: a) Variação da vazão diária observada e simulada na bacia do Taboão ao longo do tempo; b) Erro na estimativa da vazão diária em relação à vazão observada e; c) Ajuste entre vazão diária observada e simulada na bacia no Taboão; considerando uso do método de infiltração de Green & Ampt, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith e método de propagação de escoamento <i>Variable Storage</i> (cenários 9 e 13).	69

Figura 12 - Calibração da produção diária de sedimentos no modelo SWAT: a) Variação da produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia do Taboão, ao longo do tempo; b) Erro na estimativa da produção diária de sedimentos em relação à produção diária de sedimentos observada e; c) Ajuste entre produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia no Taboão; considerando uso do método de infiltração da Curva Número, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith, método de propagação de escoamento Variable Storage e transporte de sedimentos pela equação de Bagnold (cenário 1).	75
Figura 13 – Calibração da produção diária de sedimentos no modelo SWAT: a) Variação da produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia do Taboão, ao longo do tempo; b) Erro na estimativa da produção diária de sedimentos em relação à produção diária de sedimentos observada e; c) Ajuste entre produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia no Taboão; considerando uso do método de infiltração de Green & Ampt, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith, método de propagação de escoamento Variable Storage e transporte de sedimentos pela equação de Bagnold (cenário 9)	78
Figura 14 - Validação da produção diária de sedimentos no modelo SWAT: a) Variação da produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia do Taboão, ao longo do tempo; b) Erro na estimativa da produção diária de sedimentos em relação à produção diária de sedimentos observada e; c) Ajuste entre produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia no Taboão; considerando uso do método de infiltração da Curva Número, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith, método de propagação de escoamento Variable Storage e transporte de sedimentos pela equação de Bagnold (cenário 1)	80
Figura 15 - Validação da produção diária de sedimentos no modelo SWAT: a) Variação da produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia do Taboão, ao longo do tempo; b) Erro na estimativa da produção diária de sedimentos em relação à produção diária de sedimentos observada e; c) Ajuste entre produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia no Taboão; considerando uso do método de infiltração de Green & Ampt, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith, método de propagação de escoamento Variable Storage e transporte de sedimentos pela equação de Bagnold (cenário 1).	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Influência da posição do parâmetro na análise de sensibilidade	32
Tabela 2 – Classificação de desempenho para simulação dos processos hidrossedimentológicos, considerando os índices estatísticos comumente utilizados	36
Tabela 3 - Classificação do uso do solo presente na bacia do Taboão/RS para a modelagem no SWAT.....	40
Tabela 4 - Classificação do tipo de solo presente na bacia do Taboão/RS para a modelagem no SWAT.....	40
Tabela 5 - Coordenadas e altitude dos pluviógrafos e da estação climatológica	46
Tabela 6 - Dados médios mensais utilizados no modelo SWAT	47
Tabela 7 - Dados climáticos médios mensais utilizados no modelo SWAT.....	48
Tabela 8 - Características físico-hídricas das classes de solo presentes na bacia do Taboão...50	
Tabela 9 – Cenário simulados com diferentes equações	52
Tabela 10 - Estatísticas diárias das variáveis precipitação, vazão e produção de sedimentos na bacia do Taboão.....	53
Tabela 11 - Parâmetros utilizados para análise de sensibilidade, calibração e validação dos processos hidrossedimentológicos na bacia do Taboão.	56
Tabela 12 - Análise de sensibilidade dos parâmetros para o processo de calibração da vazão utilizando o método de infiltração Curva Número, considerando a estatística <i>p-Value</i> e classificação de importância dos parâmetros proposta por Van Griensven et al. (2006).....	57
Tabela 13 - Análise de sensibilidade dos parâmetros para o processo de calibração da vazão utilizando o método de infiltração Green & Ampt, considerando a estatística <i>p-Value</i> e classificação de importância dos parâmetros proposta por Van Griensven et al. (2006).....	59
Tabela 14 – Eficiência do modelo SWAT na calibração e na validação da vazão diária na bacia do Taboão, considerando diferentes equações de cálculo da evapotranspiração e diferentes métodos de infiltração e de propagação do escoamento no canal	62
Tabela 15 - Análise de sensibilidade dos parâmetros para o processo de calibração da produção diária de sedimentos na bacia do Taboão	71
Tabela 16 – Eficiência do modelo SWAT na calibração e na validação da produção diária de sedimentos na bacia do Taboão, considerando diferentes equações de cálculo da evapotranspiração e diferentes métodos de infiltração e de propagação do escoamento no canal	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADJ_PKR	Fator de ajuste da taxa de pico para o aporte de sedimentos na sub-bacia
ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base
ANSWERS	Area Non-Point Source Watershed Enviromental Response Simulation
BLAI	Índice de área foliar potencial máxima
BIOMIX	Eficiência biológica
C-FACTOR	Fator de uso e a cobertura do solo
CANMX	Quantidade máxima de água da chuva interceptada pela vegetação plenamente desenvolvida, disponível para evaporar sem atingir o solo
CH_BED_BD	Volume de sedimentos no leito do canal
CH_BED_D50	Diâmetro médio da partícula do banco de sedimentos do canal
CH_BED_KD	Diâmetro médio da partícula no canal principal
CH_BED_TC	Tensão de cisalhamento crítica do canal (N/m ²)
CH_BNK_BD	Volume do banco de sedimentos do canal
CH_BNK_D50	Diâmetro médio da partícula
CH_BNK_KD	Erodibilidade do banco de sedimentos
CH_BNK_TC	Tensão de corte crítica no leito do canal
CH_COV1	Fator de erodibilidade do canal
CH_COV2	Fator de cobertura vegetal do canal
CH_D50	Erodibilidade do banco de sedimentos
CH_ERODMO	Fator de erodibilidade do canal
CH_K2 e CH_K1	Condutividade hidráulica efetiva do canal principal e tributários respectivamente (mm/h)
CH_N2 e CH_N1	Coefficiente de rugosidade de Manning do canal principal e tributários, respectivamente
CN2	Valor inicial da Curva Número do escoamento superficial para a condição de umidade II (solo úmido)
CSS	Concentração de sedimentos suspensos
DEWPT	Média diária do ponto de orvalho para cada mês (°C)
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPCO	Fator de crescimento da cultura
EPIC	Erosion Productivity Impact Calculator

ESCO	Fator de compensação da evaporação do solo
EUA	Estados Unidos da América
EUROSEM	European Soil Erosion Model
GLEAMS	Ground Water Loading Effects on Agricultural Systems
GLUE	Probabilidade Generalizada da Estimativa de Incerteza
GW_DELAY	Regula o tempo de recarga do aquífero, representando o tempo necessário para a água atravessar a camada imediatamente abaixo da zona de raízes até chegar ao aquífero superficial (dias)
GW_REVAP	Coefficiente que controla o fluxo de água da zona saturada para a não saturada
GWQMN	Profundidade do aquífero para escoamento de base (mm)
GX	Gleissolo Háplico
HRU	Hydrologic Response Units
HRU_SLP	Média da declividade de cada HRU (% ou m/m)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
KINEROS	KINematic EROsion Simulation
LAT_SED	Concentração de sedimentos no escoamento subsuperficial (mg/L)
LAT_TTIME	Escoamento lateral (dias)
LISEM	Limburg Soil Erosion Model
LVd1	Latossolo Vermelho Distrófico típico
LVd2	Latossolo Vermelho Distrófico
LVdf1	Latossolo Vermelho Distroférico típico
LVdf2	Latossolo Vermelho Distroférico
LVdf3	Latossolo Vermelho Distroférico típico a moderado
MCMC	Métodos de Monte Carlo via Cadeias de Markov
MUSLE	Equação Universal de Perdas de Solo Modificada
NS	Nash-Sutcliffe
NVef	Nitossolo Vermelho Eutroférico
OV_N	Coefficiente de rugosidade de Manning para escoamento na superfície
ParaSol	Solução de Parâmetros
PSO	Método do enxame de partículas
PBIAS	Porcentagem bias (%)

PCCSKW	Coeficiente de assimetria para a precipitação diária por mês
PCPD	Média mensal de dias de precipitação no mês (dias)
PCPMM	Média mensal da precipitação total (mm)
PCPSTD	Desvio padrão para a precipitação diária do mês (mm)
PR_W1	Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos para o mês
PR_W2	Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos para o mês
PRF	Fator de ajuste da taxa de pico para aporte de sedimentos no canal
PSO	Particle Swarm Optimization
PVG	Posto pluviométrico
RAINHHMX	Valor máximo de 0,5 h de chuva para o mês (mm)
RCHRG_DP	Regula a percolação da zona de raízes para o aquífero profundo
REVAPMN	Profundidade limite de água no aquífero raso para ocorrer revap
RLe	Neossolo Litólico Eutrófico
RMSE	Raiz quadrada do erro quadrático médio
RNA	Rede neural artificial
RSDIN	Material residual depositado nos primeiros 10 mm do solo (Kg/ha)
RSR	Coeficiente de desvio padrão das observações
RYbe	Neossolos Flúvicos Tb Eutróficos
SCS	Soil Conservation Service
SHALLST	Profundidade inicial da água no aquífero raso (mm)
SLSOIL	Comprimento da declividade para o escoamento subsuperficial (m)
SLSUBBSN	Comprimento de rampa médio para a sub-bacia (m)
SOLARAV	Média diária de radiação solar para cada mês (MJ/m ² /dia)
SOL_ALB	Albedo em uma dada camada do solo
SOL_AWC	Capacidade de água no solo na camada do solo
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada na camada do solo (mm/h)
SOL_Z	Profundidade da camada de solo (mm)
SPCON	Parâmetro linear para o cálculo da quantidade máxima de sedimentos que pode estar reentrando durante o aporte de sedimentos no canal (m/s)
SPEXP	Parâmetro exponencial para o cálculo da reentrada de sedimentos no canal
SUFI-2	Sequential Uncertainty Fitting algorithm
SURLAG	Coeficiente de atraso (lag) do escoamento superficial (h)

SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SWAT-CUP	SWAT Calibration and uncertainty procedures
TMPMN	Média mensal de temperatura mínima diária (°C)
TMPMX	Média mensal de temperatura máxima diária (°C)
TMPSTDMN	Desvio padrão para a temperatura mínima diária de cada mês (°C)
TMPSTDMX	Desvio padrão para a temperatura máxima diária de cada mês (°C)
USLE	Equação Universal de Perdas de Solo
USLE_C	Valor mínimo do fator C de cobertura vegetal da USLE
USLE_K	Fator de erodibilidade do solo da USLE
USLE_P	Fator P de práticas de suporte da USLE
WEPP	Water Erosion Prediction Project
WESP	Watershed Erosion Simulation Program
WNDV	Média diária da velocidade do vento para cada mês (m/s)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS DA PESQUISA	18
2.1	OBJETIVO GERAL	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3	REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1	CICLO HIDROLÓGICO E BACIAS HIDROGRÁFICAS	19
3.1.1	Impactos ambientais decorrentes de atividades antrópicas em bacias hidrográficas	22
3.2	DINÂMICA DOS PROCESSOS EROSIVOS NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS	23
3.3	PRODUÇÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS	25
3.4	MODELOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS	26
3.4.1	O modelo <i>Soil and Water Assessment Tool</i> (SWAT)	30
3.4.1.1	Análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo SWAT	31
3.4.1.2	Índices de eficiência para avaliação do desempenho de simulações com o modelo SWAT	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS	37
4.1	ÁREA DE ESTUDO E CARACTERÍSTICAS FÍSICO-CLIMÁTICAS	37
4.2	CLASSES DE USO DO SOLO, TIPOS DE SOLOS E DECLIVIDADES PRESENTES NA BACIA DO TABOÃO/RS	39
4.3	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS NO MODELO SWAT	44
4.3.1	Monitoramento do nível de água e determinação da vazão no exutório da bacia do Taboão	45
4.3.2	Precipitação e dados climáticos requeridos para simulação do modelo SWAT	46
4.3.3	Determinação da produção de sedimentos no exutório da bacia do Taboão	48
4.3.4	Características físico-hídricas do solo requeridas pelo modelo SWAT	49
4.3.5	Cenários Simulados	51
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53

5.1	ESTATÍSTICAS DOS DADOS OBSERVADOS NA BACIA DO TABOÃO: PRECIPITAÇÃO, VAZÃO E SEDIMENTOS	53
5.2	AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS SIMULADOS PELO MODELO SWAT	54
5.2.1	Análise de sensibilidade do modelo SWAT para estimativa da vazão diária na bacia do Taboão.....	55
5.2.2	Calibração e validação do modelo SWAT para estimativa da vazão diária na bacia do Taboão.....	61
5.2.4	Análise de sensibilidade para produção diária de sedimentos na bacia do Taboão	71
5.2.5	Calibração e validação do modelo SWAT para produção diária de sedimentos na bacia do Taboão.....	72
5.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS PARA OS DIFERENTES CENÁRIOS AVALIADOS	82
6	CONCLUSÃO	88
	REFERÊNCIAS	90
	ANEXO A - PRINCIPAIS EQUAÇÕES PARA SIMULAÇÃO DOS PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS NO MODELO SWAT	103

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos núcleos urbanos e o avanço das atividades agropecuárias, ocorreu, na maioria dos territórios, sem uma preocupação em relação à conservação dos recursos naturais. Essa forma de ocupação, por sua vez, desencadeou inúmeras pressões sobre o meio ambiente e ocasionou uma série de consequências, entre as quais, a erosão dos solos, a degradação dos recursos hídricos e a perda da capacidade produtiva dos solos, tanto em termos quantitativos quanto qualitativos.

As partículas de sedimentos erodidas ao atingir os corpos hídricos ocasionam a alteração da qualidade da água, em especial pelos sedimentos atuarem como carreadores de poluentes, gerando a elevação da turbidez, a redução da atividade fotossintética e a alteração da biota aquática; além de causar o aumento do risco de inundação nas áreas mais planas, em razão da deposição de sedimentos na calha fluvial. Em reservatórios de acumulação, o processo de assoreamento reduz o volume de água disponível e a vida útil da estrutura, afetando seu potencial de utilização (CARVALHO, 2008).

Neste cenário, tem crescido nas últimas décadas a preocupação e o incentivo a pesquisas que buscam identificar alternativas de manejo e de gerenciamento adequado das bacias hidrográficas, de modo a possibilitar um planejamento conservacionista do uso dos recursos naturais, visando a preservação e a recuperação dessas bacias hidrográficas. Diversos estudos têm sido desenvolvidos nesse contexto, como, Yang et al. (2018), que avaliaram a eficácia de medidas como o terraceamento, o cultivo em contorno e as emendas orgânicas para melhorar a qualidade do solo no planalto da China. De maneira semelhante, Pan et al. (2021) apresentam exemplos de técnicas eficazes de controle de erosão, como o uso de cobertura do solo, plantação de gramíneas e construções como terraços, barragens e cortinas de contenção. Já Ndiwe et al. (2022) realizaram uma revisão das estratégias de manejo do solo que poderiam ajudar a mitigar a erosão, incluindo práticas agrícolas sustentáveis, técnicas de conservação do solo e políticas de gestão de terras. Todos esses estudos destacam a importância de uma abordagem holística e integrada para o controle da erosão do solo e manejo adequado do solo em áreas agrícolas.

Uma das alternativas encontradas para entender os componentes do ciclo hidrológico para tomadas de decisões no dia-a-dia, e contribuir para uma gestão mais eficiente, reside na utilização de modelos hidrossedimentológicos. Tais modelos permitem avaliar como a bacia hidrográfica irá responder a diferentes condições meteorológicas, práticas de manejo e de gerenciamento, entre outras análises possíveis (VARGAS et al., 2019). Entre os tipos de

modelos existentes, têm-se os modelos puramente empíricos, baseados em observações mensuradas dos fenômenos, e os modelos de base física que, através de equações matemáticas e parâmetros do meio físico, procuram reproduzir matematicamente os processos hidrossedimentológicos. O amplo uso desses modelos ocorre, principalmente, pelo baixo custo em sua aplicação, além de viabilizarem a simulação das condições atuais e futuras e permitirem o planejamento das intervenções mais adequadas para cada caso (SARI, 2017).

Entre os modelos atualmente disponíveis está o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), um modelo com interface integrada a um Sistema de Informações Geográficas (SIG), capaz de simular os processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica a partir da entrada de informações climáticas, de uso do solo, de tipo de solo e de topografia. Esse modelo tem sido empregado em muitos países, entre os quais o Brasil, para investigar alterações ocorridos no manejo e no uso do solo, para estimativa de processos hidrossedimentológicos e de qualidade das águas, entre outros (GASSMAN et al., 2007; BRESSIANI et al., 2015).

Entretanto, há que se considerar que as bacias hidrográficas são sistemas dinâmicos e complexos, que envolvem uma interrelação de diversos processos físicos (naturais e antropogênicos), os quais ocorrem simultaneamente, podendo gerar consequências em diferentes escalas temporais e espaciais (ZABALETA; ANTIGUEDAD, 2013). Em razão disso, a hidrologia desses sistemas naturais pode ser caracterizada por uma enorme variabilidade no espaço, no tempo e nos processos (KIRNBAUER et al., 2005). Entender a modelagem desses processos é essencial para assegurar uma gestão adequada dessas bacias hidrográficas.

É preciso ponderar também, que a distribuição da precipitação ao longo do dia apresenta influência sobre a modelagem dos processos hidrossedimentológicos, afetando a dinâmica de sua ocorrência nas bacias hidrográficas (ZABALETA et al., 2007, 2014). Desse modo, escalas de tempo utilizadas para os dados de entrada e de saída dos modelos podem afetar os resultados obtidos (JEONG et al., 2010, 2011; MAHARJAN et al., 2013; MEAURIO et al., 2021; YANG et al., 2016).

Nesse contexto, essa pesquisa investigou a eficiência do modelo SWAT para simulação dos processos hidrossedimentológicos na bacia hidrográfica do Taboão, Rio Grande do Sul (RS), procurando identificar quais equações e métodos de infiltração, evapotranspiração, propagação do escoamento e de transporte de sedimentos nos canais, disponíveis nas rotinas do modelo, melhor representam os processos presentes, considerando escala diária dos dados hidrossedimentológicos de saída do modelo e diferentes resoluções temporais dos dados de

entrada de precipitação.

A bacia hidrográfica do Taboão está localizada sobre a região do planalto médio do estado do Rio Grande do Sul, no derrame basáltico sul-rio-grandense (BORGES; BORDAS, 1988), em uma região econômica de grande importância para o cultivo agrícola no estado. A bacia apresenta problemas de erosão do solo e de escoamento superficial, com presença de ravinas e voçorocas, ocorridas, possivelmente, em consequência das atividades de agricultura e pecuária desenvolvidas, por muitos anos, sem uso de práticas adequadas de manejo do solo e da água (CASTRO; CHEVALLIER; SILVEIRA, 1993; VIERO, 2004).

2 OBJETIVOS DA PESQUISA

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência do modelo SWAT para simulação dos processos hidrossedimentológicos na bacia hidrográfica do Taboão (RS, Brasil), utilizando diferentes equações para estimativas dos processos hidrológicos e distintos métodos de propagação de escoamento e de transporte de sedimentos nos canais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calibrar e validar o modelo SWAT para estimativa de vazão na bacia hidrográfica do Taboão, considerando o emprego de diferentes equações de evapotranspiração e dados de entrada diários de precipitação, associados ao modelo de infiltração da Curva Número e a diferentes métodos de propagação do escoamento nos canais fluviais;
- Calibrar e validar o modelo SWAT para estimativa de vazão na bacia hidrográfica do Taboão, considerando o emprego de diferentes equações de evapotranspiração e dados de entrada horários de precipitação, associados ao modelo de infiltração Green & Ampt e a diferentes métodos de propagação do escoamento nos canais fluviais;
- Calibrar e validar os modelos verificados como de melhor previsão da vazão para a estimativa da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Taboão, considerando o uso de diferentes métodos de transporte de sedimentos no canal.
- Comparar os resultados com aqueles já obtidos em pesquisas anteriores realizadas na bacia (SARI, 2017; MARIANI et al., 2023¹).

¹ Artigo aceito para publicação. Traz resultados de calibração e de validação do modelo SWAT para estimativa da vazão e da produção de sedimentos diária, considerando dados horários e diários de precipitação, com emprego dos métodos de Green & Ampt e da Curva Número, e análise de propagação na calha fluvial pelo método de Variable Storage e transporte de sedimentos no canal pelo modelo de Bagnold.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Esse capítulo busca apresentar aspectos relevantes da literatura sobre ciclo hidrológico, bacias hidrográficas e os impactos decorrentes da ação antrópica sobre essas bacias. Também descreve a dinâmica dos processos erosivos, a produção e o transporte de sedimentos, além de apresentar os modelos hidrossedimentares existentes e aplicações do modelo SWAT à simulação dos processos hidrossedimentológicos.

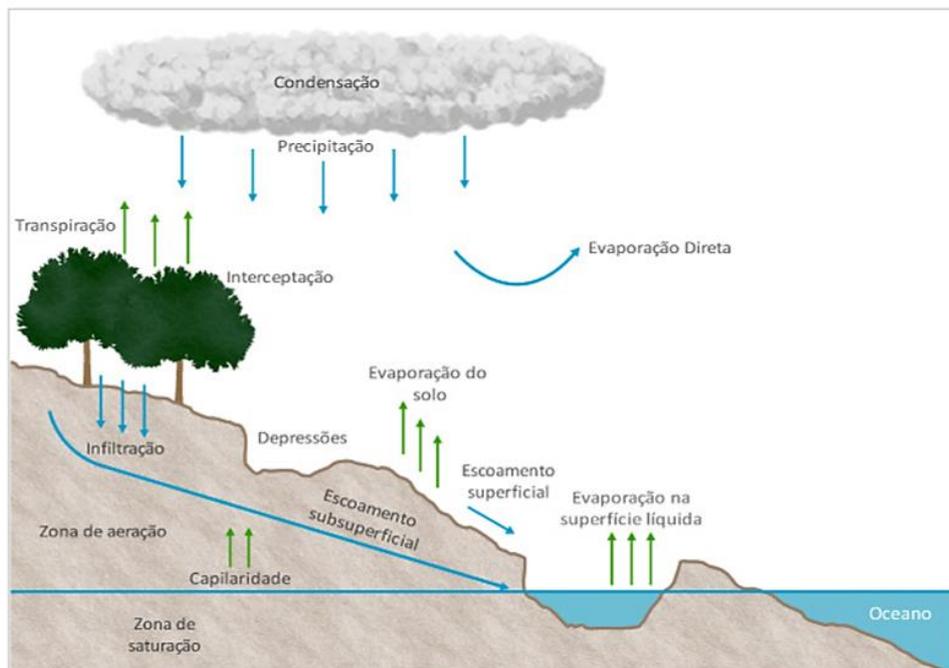
3.1 CICLO HIDROLÓGICO E BACIAS HIDROGRÁFICAS

O ciclo da água envolve a presença e a circulação de água na superfície da terra, em ambientes aquáticos (tais como: mares e oceanos), entre o subsolo e nas camadas da atmosfera. Essa dinâmica do movimento é alimentada pela energia proveniente do sol, gravidade e rotação da Terra, e a água pode ser encontrada em diferentes estados físicos, como, sólido, líquido ou gasoso (TUCCI, 2004). O ciclo hidrológico é dividido em diferentes fases, como:

- a) precipitação: corresponde a água que cai sobre a superfície terrestre quando condensada, em forma líquida ou sólida provinda da atmosfera;
- b) infiltração: água que cai sobre a superfície e infiltra no solo, nessa fase ocorre a redistribuição da água dentro desse solo, de acordo com sua capacidade de infiltração;
- c) escoamento superficial: deslocamento superficial da água sobre a superfície até rios, mares e oceanos;
- d) escoamento subsuperficial: deslocamento da água que se infiltrou no solo, por meio de poros, fraturas e fissuras, resultando na origem de córregos;
- e) percolação: movimento da água dentro do perfil do solo, garantindo a alimentação dos corpos hídricos quando rasa ou a alimentação de aquíferos quando profunda;
- f) evaporação: é um processo físico de mudança de fase, passando do estado líquido para o estado gasoso. A evaporação de água ocorre de oceanos, lagos, rios, do solo e da vegetação úmida; e
- g) transpiração: processo biofísico, pelo qual a água que passou pela planta, fazendo parte de seu metabolismo, é transferida para a atmosfera, é um mecanismo extremamente importante, considerando-se uma área coberta de vegetação.

Tais processos podem ser visualizados na Figura 1.

Figura 1 - Estágios do Ciclo Hidrológico



Fonte: Hartwig (2012).

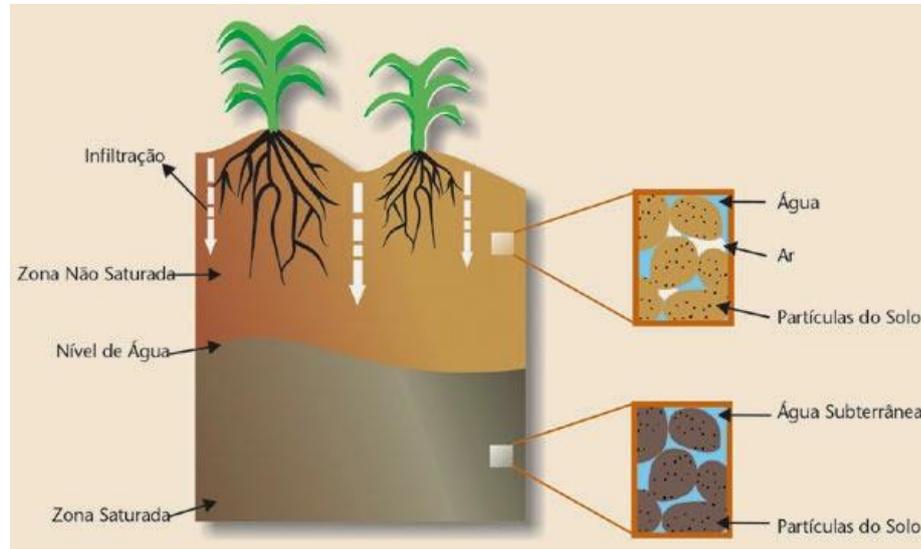
O solo representa um importante compartimento relacionado ao ciclo hidrológico, exercendo grande influência sobre seus processos. O movimento nesse compartimento inicia pela infiltração, na qual a água precipitada entra no solo. Em seguida inicia-se o processo de percolação, caracterizado pelo movimento da água no perfil do solo. Durante esta etapa, a água é redistribuída pela área não-saturada e pela zona saturada (Figura 2). Além disso, também ocorre a evapotranspiração das plantas e a evaporação do solo (CARVALHO; SILVA, 2006).

A bacia hidrográfica é o elemento básico comumente utilizado para análise do ciclo hidrológico, sendo definida como uma unidade geográfica utilizada em estudos hidrológicos, correspondendo a um sistema ambiental, dentro de uma área de superfície terrestre, delimitada por divisores topográficos. Essa área é composta por uma rede de canais de drenagem e é o local onde a precipitação é captada, drenando água, materiais dissolvidos e em suspensão para um único ponto de saída, conhecido como exutório da bacia (PRESS et al., 2006; TUCCI, 2004).

O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é determinado pelas suas características geomorfológicas, tais como: forma, relevo, área, geologia, rede de drenagem, solo, entre outros, bem como pelo tipo de cobertura (uso e ocupação do solo). Assim, as características físicas, bióticas e antrópicas de uma bacia desempenham um papel importante nos processos do ciclo hidrológico, influenciando diretamente a infiltração, a quantidade de

água produzida como deflúvio, a evapotranspiração e os escoamentos superficial e subsuperficial (TONELLO, 2005).

Figura 2 - Zona saturada e não-saturada do solo



Fonte: Carvalho e Silva (2006).

Desse modo, a dinâmica da água em uma bacia hidrográfica é um processo complexo, influenciado por diversos fatores, como, por exemplo, o tamanho da bacia, as condições climáticas que afetam a precipitação e as perdas decorrentes da evapotranspiração e da infiltração (CHRISTOFOLETTI, 1981; FARIA et al., 2021; OLIVEIRA; ZOLIN; FRITZSONS, 2020).

As bacias hidrográficas permitem a realização de uma ampla gama de análises ambientais, visando avaliar os impactos causados por atividades antrópicas, tais como alterações no uso e no manejo do solo e a expansão urbana. Esses impactos podem representar riscos para o equilíbrio ambiental e para a manutenção da quantidade e da qualidade dos recursos hídricos, tendo uma relação direta com o uso e a ocupação do solo na bacia (GARCIA, 2016).

Há que se considerar também, que a bacia hidrográfica é um sistema complexo, composto por uma interrelação de diversos processos físicos, os quais são impactados pela presença das atividades antrópicas (MOR, 2012; ZABALETA; ANTIGUEDAD, 2013). Dessa maneira, a longo prazo, variáveis interpretadas como constantes no tempo podem se modificar, introduzindo maiores complexidades à análise do sistema (MOR, 2012).

3.1.1 Impactos ambientais decorrentes de atividades antrópicas em bacias hidrográficas

A relação entre o homem e a paisagem natural resulta em diversas alterações dos ambientes, tanto harmônicas quanto prejudiciais, as quais podem comprometer a qualidade dos recursos e, por conseguinte, a qualidade de vida (CUNICO; OKA-FIORI, 2008). Essas alterações são tradicionalmente nomeadas como impacto ambiental, representando qualquer variação na qualidade ambiental, decorrentes de modificações nos processos naturais ou sociais, como consequência de uma ação humana (SÁNCHEZ, 2006).

No estudo da bacia hidrográfica, observa-se que a atividade agropecuária está entre as principais fontes geradoras de impactos ambientais. De fato, a expansão das áreas de cultivo e de pastagem resulta, muitas vezes, em: desmatamento, incêndios florestais, poluição por dejetos animais e agrotóxicos, erosão e degradação do solo, contaminação da água, entre outros (FIRMINO; FONSECA, 2008).

Essas alterações no uso e na cobertura da terra têm impactos significativos no equilíbrio hídrico do solo, afetando tanto as camadas superficiais quanto as subsuperficiais, levando à erosão e ao transporte de sedimentos, e conseqüentemente, a modificações nos ecossistemas terrestres e aquáticos (TOLEDO, 2001).

Acrescente-se ainda que, as práticas agropecuárias podem originar a degradação ambiental em razão do aumento no uso de fertilizantes, os quais afetam a composição química do solo. A utilização constante de herbicidas também pode acarretar no acúmulo desses produtos e, conseqüentemente, afetar os microrganismos presentes no solo. A situação se torna ainda mais preocupante quando se utilizam vários tipos de herbicidas em dosagem acima do recomendado, pois, na ocorrência de eventos de precipitação, esses produtos são transportados para rios, lagos e águas subterrâneas, especialmente em associação com os sedimentos, causando danos ao meio ambiente (GROSSI, 2006).

Em geral, a degradação do solo é uma consequência de investimentos insuficientes na manutenção de pastagens, o que pode levar à compactação e à erosão do solo, bem como à poluição dos recursos hídricos, em virtude das cargas de nutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio) presentes no esterco, além dos hormônios, metais pesados e patógenos, transportados para o leito dos rios através da lixiviação do solo (ZEN et al., 2008).

A urbanização também é um fenômeno com implicações significativas nas paisagens naturais e, embora traga muitos benefícios, é fundamental que seja realizado um gerenciamento e um planejamento dos impactos gerados. Por certo, com o crescimento das cidades e a

expansão das atividades humanas, ocorre uma série de problemas ambientais, como a impermeabilização do solo, a degradação de encostas, a alteração de cursos de rios e a geração de resíduos inadequadamente gerenciados. Estas atividades resultam em problemas como o aumento do escoamento superficial, a erosão, o rompimento de canais, de galerias de esgoto e de pontes, além do risco de contaminação dos corpos hídricos devido ao transporte de contaminantes associados aos sedimentos (CUNICO, 2007).

Por conseguinte, a intervenção humana, quando combinada com eventos climáticos como chuvas e escoamento superficial, tem um papel importante na degradação das bacias hidrográficas, resultando em quantidades excessivas de sedimentos transportados para rios e reservatórios, muitas vezes, superando as taxas normais encontradas em condições naturais equilibradas (PAIVA; PAIVA, 2003).

3.2 DINÂMICA DOS PROCESSOS EROSIVOS NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

A erosão dos solos é um fenômeno altamente complexo, resultante da interação entre uma variedade de fatores, tais como as características geológicas e geomorfológicas do terreno, os tipos de solo, as condições climáticas, a vegetação e a intervenção humana, que podem modificar e acelerar as condições naturais desses elementos (OLIVEIRA; SANTOS; ARAUJO, 2018). De maneira geral, ela pode ser descrita como o processo de desagregação e de transporte de partículas de solo ou de fragmentos rochosos, que após serem removidos, são transportados e depositados pela ação combinada de agentes erosivos, tais como vento, água, gelo, gravidade ou organismos (FENDRICH; OBLADEN; AISSE, 1997).

Por certo, atividades como desmatamento, ocupação urbana sem planejamento, exploração de recursos naturais, construção de estradas e barragens e produção agrícola podem causar impactos irreversíveis no meio ambiente, além de prejuízos econômicos, sociais e culturais. (OLIVEIRA; SANTOS; ARAUJO, 2018). Esses processos têm sido amplamente estudados como agentes significativos na modificação da paisagem ao longo do tempo e em diferentes localidades

A erodibilidade do solo, que resulta na desagregação e no transporte de partículas de sedimentos, é determinada pela capacidade do solo de reagir aos processos erosivos hidrológicos (DENARDIN et al., 2005).

No Brasil, a erosão hídrica é identificada como a forma mais prejudicial de erosão, devido às características climáticas e os tipos de solo presentes no país (FERREIRA, 1981).

Esse tipo de erosão é caracterizada pelo transporte de partículas de solo pela ação da água, através do processo de arrastamento. Existem diversas formas de erosão hídrica, entretanto, a erosão pluvial e a erosão fluvial nas encostas marginais dos rios são consideradas as mais significativas (ARROIO JUNIOR, 2013).

A erosão causada pelo escoamento das águas pluviais está fortemente relacionada à intensidade da chuva, que pode ser medida pela quantidade de precipitação em um período de tempo específico (GUERRA; CUNHA, 2001; RITTER, 2012). Segundo Guerra (1999), a erosão é iniciada pela chuva que impacta o solo, causando quebra dos agregados e desagregação de partículas. Com o avanço da chuva, o solo fica saturado formando poças, ocasionando o fenômeno conhecido como selamento. Isso resulta em redução do impacto da chuva, mas, por outro lado, no aumento do escoamento superficial ou *runoff*. A água então começa a escoar na superfície, primeiro em forma de lençol e depois através de fluxos lineares, levando consigo as partículas desagregadas. A deposição do material erodido ocorre quando a energia disponível é insuficiente para transportá-lo, resultando no acúmulo de sedimentos nas planícies e no leito dos cursos d'água (GUERRA, 1995; CARVALHO, 2008).

Esse tipo de erosão é geralmente classificado em dois tipos principais: erosão laminar e erosão linear (GUERRA; CUNHA, 2001; RITTER, 2012).

A erosão laminar é caracterizada pela remoção de uma camada fina e relativamente uniforme de solo, através da precipitação e do escoamento superficial. Essa forma de erosão ocorre em toda a área da bacia hidrográfica, sendo causada pelo impacto das gotas de chuva (BRAMORSKI, 2007). Essa erosão é considerada a forma mais prejudicial e grave de erosão com difícil diagnóstico, sendo também o ponto inicial para o desenvolvimento de processos erosivos lineares (FERREIRA, 1981).

Os processos erosivos lineares são identificados pela presença de características erosivas decorrentes da concentração de fluxos de água de escoamento superficial, podendo incluir sulcos, ravinas ou voçorocas. (ARROIO JUNIOR, 2013).

A erosão em sulcos ocorre devido à desagregação e o transporte das partículas do solo, causadas pelas forças hidráulicas geradas pelo escoamento superficial concentrado, originado pelas chuvas (POLYAKOV; NEARING, 2003). É caracterizada por pequenas incisões na superfície terrestre, com formato de filetes rasos e perpendiculares às curvas de nível. Essa forma de erosão comumente apresenta dimensões inferiores a 50 centímetros de profundidade e largura, com pequenas rupturas nas bordas na superfície do terreno (GUERRA; CUNHA, 2001).

Já a formação de ravinas é causada pela expansão do raio hidráulico e do perímetro molhado dos sulcos de erosão, em razão da ação contínua do escoamento cisalhante (LAFAYETTE; CANTALICE; COUTINHO, 2011). A erosão em forma de ravinas é caracterizada por dimensões significativas, com largura superior a um metro e profundidade superior a 0,5 metros. Ela apresenta bordas abruptas, causando rupturas instáveis na superfície do terreno, sendo considerada uma forma de erosão de grande porte (GUIMARÃES et al., 2008).

A formação de voçorocas, por sua vez, é consequência do alargamento, do aprofundamento e do aumento do comprimento das ravinas. Essas características geomorfológicas também podem ser causadas pelo escoamento subsuperficial, que provoca o colapso do teto, resultando em grandes buracos na superfície do solo (GUERRA; BOTELHO, 1996). A voçoroca é considerada o estágio mais avançado da erosão, requerendo esforços significativos para sua contenção e elevados custos para a recuperação da área degradada. Além da erosão superficial, essa feição pode causar aprofundamento no solo, atingindo o lençol freático, levando à surgência de água e, conseqüentemente, carreamento de sedimentos e formação de vazios no interior do solo (CARVALHO et al., 2006).

As formas de erosão descritas são comumente encontradas em bacias rurais, devido às condições físico-químicas que favorecem o desenvolvimento de processos erosivos e também, em razão da ausência de manejo adequado do solo (SALOMONS; BRILIS, 2004).

3.3 PRODUÇÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

O sedimento é descrito como uma partícula originada de rochas ou materiais biológicos, transportada por meio de processos físicos ou químicos, como, água ou vento, a partir de seu local de origem para rios e locais de deposição. Os processos relacionados à sedimentação são complexos e envolvem etapas tais como: erosão, deslocamento de partículas, transporte através dos cursos de água, deposição em calhas de rios, lagos e reservatórios e compactação final (CARVALHO, 2008).

Quantificar precisamente a erosão e a produção de sedimentos em bacias hidrográficas é uma tarefa desafiadora, especialmente em função da complexidade dos processos e do grande número de variáveis interdependentes envolvidas, o que torna a erosão um fenômeno difícil de ser descrito analiticamente (LOPES; SRINIVISAN, 1981).

A produção de sedimentos é compreendida como a quantidade de partículas erodidas

transportadas pelo curso d'água, podendo ser medida em metros cúbicos ou toneladas, podendo também, ser expressa como uma produção específica, em $m^3/km^2/ano$ ou $t/km^2/ano$, quando relacionada à área da bacia (PEREIRA, 2010). Ainda segundo Walling (1990), a produção de sedimentos é apenas uma parte do total de sedimentos gerados em uma bacia hidrográfica em decorrência de processos erosivos. Isso porque uma quantidade significativa de material erodido é depositada ao longo das vertentes e, portanto, não é removida da bacia de drenagem.

Dessa forma, o ciclo hidrossedimentológico envolve a transferência de materiais resultantes da erosão, principalmente através da ação das águas de escoamento superficial. A velocidade e a eficiência desse transporte estão relacionadas às condições topográficas e à granulometria dos materiais envolvidos. O transporte ocorre por meio de fluxo de massa, seja por rolamento e arraste de partículas ou ainda, por suspensão (VESTANA, 2008).

Os sedimentos transportados até os cursos de água apresentam uma variedade de formas, tamanhos e pesos, e são submetidos a um processo de transporte distinto, baseado nas condições locais e do escoamento; sendo comumente dividido em duas categorias: carga de fundo (ou carga do leito) e carga em suspensão (ou carga sólida em suspensão) (CARVALHO, 2008). A soma dessas cargas representa a quantidade total de sedimentos que pode ser transportada pelo escoamento de água e sob determinadas condições de contorno (SARI, 2017).

A deposição dos sedimentos transportados ocorre quando a força do escoamento diminui até um ponto em que a partícula não pode mais ser movida. Estes depósitos geralmente ocorrem em áreas relativamente mais baixas, tais como depressões naturais ou em encostas de declividade menor. Além disso, esses materiais podem ingressar na rede de drenagem e serem transportados pelos cursos d'água até o oceano ou permanecerem retidos em reservatórios, nas margens de cheia, em planícies de inundação, deltas e estuários (CARVALHO, 2008).

3.4 MODELOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS

A modelagem matemática computacional representa uma importante ferramenta de avaliação dos processos hidrossedimentológicos e de qualidade da água, possibilitando a investigação do efeito de práticas de uso e do manejo do solo, bem como de diferentes condições meteorológicas e práticas conservacionistas sobre os processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica (HEATHMAN; LAROSE; ASCOUGH II, 2009), especialmente em razão dos custos e do tempo envolvido em amostragens diretas em campo.

Há que se considerar, todavia, que cada tipo de modelo tem sua finalidade específica e

nenhum modelo é aplicável a todas as situações. A escolha do modelo adequado deve ser realizada considerando o objetivo específico a ser alcançado, ponderando fatores, como: dados exigidos pelo modelo, incluindo variações temporais e espaciais dos dados de entrada e de saída; precisão e validade do modelo, considerando suas premissas básicas; componentes do modelo que refletem sua capacidade; objetivos do usuário do modelo, incluindo sua facilidade de uso, escala e formato dos dados de saída; e necessidade de capacidade computacional (MERRITT; LETCHER; JAKEMAN, 2003).

Os modelos empíricos são considerados os mais simples entre os três tipos de modelos disponíveis. Eles se baseiam principalmente na análise de dados observacionais e buscam caracterizar as respostas a partir desses dados. Devido a essa característica, eles são geralmente preferidos quando há limitações de dados e parâmetros de entrada, e são muito úteis como uma abordagem inicial para a identificação de fontes de sedimentos (WHEATER; JAKEMAN; BEVEN, 1993).

Os modelos de base física são fundamentados na resolução de equações que descrevem o fluxo de água e sedimentos em uma bacia hidrográfica, tais como as equações de conservação de massa e momento (BENNETT, 1974). As equações que descrevem os processos nesses modelos são derivadas em escalas pequenas e sob condições físicas muito específicas, entretanto, na prática, esses modelos são aplicados em escalas maiores e em condições físicas muito diferentes das condições originais, o que pode levar a resultados equivocados (BEVEN, 1989).

Os modelos conceituais geralmente incorporam mecanismos de transferência de sedimentos e geração de escoamento em sua estrutura, representando os fluxos dentro da bacia como uma série de armazenamento, cada um com sua própria dinâmica. Eles geralmente incluem uma descrição geral dos processos da bacia, sem, no entanto, incluir detalhes específicos das interações entre os processos, o que requereria informações mais detalhadas. Eles tendem a priorizar a simplicidade e a facilidade de uso, ao invés de buscar a precisão e o detalhamento dos processos (SOROOSHIAN, 1991).

Duas questões fundamentais devem ser consideradas durante a aplicação de um modelo: a sensibilidade dos parâmetros do modelo em relação aos processos simulados e a transitoriedade das condições iniciais.

Para avaliar a sensibilidade dos parâmetros é recomendável que seja realizada uma análise de sensibilidade, a qual permite identificar quais parâmetros têm maior impacto sobre as saídas do modelo. A partir dessa análise, os parâmetros mais relevantes podem ser calibrados

com dados observados para melhorar a precisão do modelo (KANNAN et al., 2007; GREEN; VAN GRIENSVEN, 2008).

Já a transitoriedade das condições iniciais pode ser contornada através do uso de um "tempo de aquecimento do modelo", que representa um período de tempo simulado para a estabilização das condições iniciais. Esse período deve ser excluído das análises posteriores das simulações, de modo a evitar distorções nos resultados (NEITSCH et al., 2002, 2005, 2011).

O modelo hidrossedimentológico mais antigo já proposto é a Equação Universal de Perda de Solo - *Universal Soil Loss Equation* (USLE) (WISCHMEIER; SMITH, 1978). Este modelo permite estimar a erosão laminar do solo através da análise de seus fatores condicionantes, tendo sido amplamente utilizado no mundo todo. O objetivo da USLE é obter estimativas da erosão do solo a médio e longo prazo, possibilitando o planejamento de práticas conservacionistas, de forma a minimizar a perda de solos em níveis aceitáveis.

Com o avanço da tecnologia e o desenvolvimento de técnicas de coleta e observação de dados de campo, outros modelos mais complexos foram sendo criados, considerando uma gama maior de variáveis em sua formulação, melhorando a representatividade dos processos simulados e a confiabilidade das respostas geradas (SILVA, 2006). A modificação da equação da USLE, também conhecida como *Modified Universal Soil Loss Equation* (MUSLE) proposta por Williams (1975), possibilitou aumentar a eficácia da equação original através da substituição do fator erodibilidade das chuvas pelo fator de energia do escoamento superficial das vertentes (FUJIHARA, 2002).

Ao longo dos anos foram sendo desenvolvidos modelos mais avançados, que contemplam não somente a modelagem da perda de solo, mas também a simulação hidrológica e outros processos inter-relacionados. A seguir são destacados alguns destes modelos.

- *Area Non-Point Source Watershed Environmental Response Simulation* (ANSWERS): é um modelo físico e distribuído baseado em eventos, desenvolvido para simular o impacto da agricultura como uso principal em bacias hidrográficas (Beasley et al., 1980).
- *European Soil Erosion Model* (EUROSEM): simula o transporte de sedimentos pela água gerada por superfícies planas uniformes interligadas. Cada módulo simula um processo físico, como interceptação e evaporação, através de equações matemáticas (MORGAN et al., 1998).
- *Kinematic Runoff and Erosion Model* (KINEROS): é um modelo distribuído, utilizado para simular um evento, descrevendo os processos de escoamento

superficial, infiltração, interceptação e a erosão, principalmente em pequenas bacias. Este modelo é utilizado para determinar os efeitos de possíveis alterações nas características da bacia, tais como: urbanização, construção de reservatórios, desmatamento, etc. (ZANETTI, 2007).

- *Limburg Soil Erosion Model (LISEM)*: foi elaborado com o intuito de estudar as práticas de conservação do solo e as técnicas de redução de erosão para a região de Limburg (Holanda) (DE ROO; OFFERMANS; CREMERS, 1996). Sua principal utilidade está associada a bacias agrícolas, especialmente para estudos de avaliações do planejamento e da conservação do solo e da água, possibilitando avaliar os efeitos na mudança dos cultivos, no uso e no manejo do solo, além de simular o processo de erosão e a dinâmica dos sedimentos durante e imediatamente após um único evento de chuva (BARROS, 2012; ARROIO JUNIOR, 2013).
- *Water Erosion Prediction Project (WEPP)*: é fundamentado nas teorias da infiltração, física do solo, fitotecnia, hidráulica e mecânica da erosão. Este modelo permite estimar a distribuição temporal e espacial da perda e da deposição de solo, assim como também a perda de solo líquida, tanto em nível diário como mensal ou anual, em cada ponto da vertente. O modelo pode ser utilizado na opção evento a evento ou para simulação contínua (AKSOY; KAVAS, 2005).
- *Watershed Erosion Simulation Program (WESP)*: é um modelo desenvolvido para simular a resposta hidrossedimentológica de pequenas bacias, localizadas em região com um clima semiárido, possibilitando a simulação do escoamento superficial e da erosão do solo (LOPES, 1987). O modelo permite simular eventos de chuva e considera tanto a erosão causada pelo impacto das gotas de chuva quanto pelo fluxo superficial. Os processos simulados são dinâmicos, variáveis e não permanentes, descritos através de taxas de erosão e deposição, em vez da abordagem convencional que utiliza funções de transporte de sedimentos para fluxo permanente (SANTOS, 2009).

Outro modelo matemático amplamente utilizado em diversas regiões do globo é o SWAT. Esse modelo permite analisar as implicações das mudanças no uso do solo, nos processos hidrossedimentológicos e na qualidade da água (SRINIVASAN; ARNOLD, 1994) e será melhor descrito no item apresentado a seguir.

3.4.1 O modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT)

O modelo SWAT foi desenvolvido em Temple no Texas (Estados Unidos) pelo *United States Department of Agriculture, Soil and Water Research Laboratory* (ARNOLD et al., 1998). O desenvolvimento desse modelo iniciou da integração de três simuladores EPIC (*Erosion Productivity Impact Calculator*), GLEAMS (*Ground Water Loading Effects on Agricultural Systems*) e CLEAMS (*Chemicals, Runoff, Erosion from Agricultural Management Systems*).

O SWAT é um modelo matemático contínuo, semidistribuído, determinístico e semiconceitual, tendo como objetivo principal a previsão das consequências das variações no uso e no manejo do solo sobre o fluxo superficial e subterrâneo, sobre a produção de sedimentos, a carga de poluentes e a qualidade da água em bacias hidrológicas de grande extensão. Essa ferramenta consegue operar em passos de tempo diários e simular períodos contínuos de dados (SRINIVASAN; ARNOLD, 1994).

Para sua operacionalização, o modelo necessita de informações precisas relacionadas ao clima, às características do solo, à topografia, à vegetação e às práticas de manejo do solo, sendo capaz de simular processos físicos relacionados ao movimento da água, ao transporte de sedimentos, ao crescimento de culturas, ao ciclo de nutrientes e a outros aspectos relevantes para a análise hidrológica (ARNOLD et al., 1998).

O modelo SWAT é disponibilizado em várias interfaces, tais como: DOS, GRASS, ArcView, ArcGIS, GRAM++ e AVSWAT-X. Ao utilizar um ambiente SIG, é possível implementar o modelo de forma mais eficiente e precisa, pois a necessidade de trabalhar com grandes volumes de dados relacionados aos processos físicos que ocorrem na bacia hidrográfica é minimizada. Além das funções básicas de aquisição, de armazenamento, de organização e de visualização de dados, o componente SIG utiliza técnicas analíticas avançadas, assegurando a melhoria da qualidade dos resultados obtidos (WINCHELL et al., 2008)

Nas simulações, a bacia hidrográfica é subdividida em sub-bacias e, posteriormente, em Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs). As HRUs representam combinações de características comuns de tipo de solo, de uso do solo e de declividade dentro de cada sub-bacia. A subdivisão é realizada de forma automatizada, após o usuário definir um nível de sensibilidade para eliminar áreas com valores menores de uso do solo, tipo de solo e declividade. Dessa forma, é possível obter uma análise mais precisa e detalhada dos processos

simulados (ARNOLD et al., 1998).

A determinação do escoamento superficial pode ser efetivada mediante a utilização de uma variação do método da Curva Número, proposto pelo *Soil Conservation Service* (SCS), que utiliza dados diários de precipitação; ou ainda, pelo método de infiltração de Green & Ampt, que requer uma resolução subdiária dos dados de precipitação. De modo geral, o modelo realiza um balanço hídrico dos processos, empregando modelos de fluxo adaptados às condições de escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo (NEITSCH et al., 2005).

O modelo SWAT pode ser utilizado para uma ampla variedade de finalidades, dependendo dos objetivos pretendidos. Alguns estudos podem buscar avaliar o comportamento hidrológico da bacia, enquanto outros podem se concentrar em simular a produção de sedimentos com base em diferentes usos e manejos do solo. Ainda, ele pode ser utilizado para simular os impactos das alterações climáticas, do desmatamento ou também, para estudar a propagação de nutrientes e pesticidas (UZEIKA, 2009).

De modo geral, o modelo tem se mostrado uma ferramenta valiosa para previsão dos processos hidrossedimentológicos, tendo sido aplicado em diversas situações e regiões do mundo. Muitas instituições e organizações, tanto públicas quanto privadas, envolvidas com a pesquisa dos processos hidrossedimentológicos e da qualidade da água, têm recorrido ao uso deste modelo como um meio para tomar decisões estratégicas no gerenciamento dos recursos hídricos e no manejo de bacias hidrográficas (ARNOLD; FOHRER, 2005; WILLIAMS et al., 2008).

3.4.1.1 Análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo SWAT

Antes de iniciar o processo de calibração de um modelo é importante que seja realizada uma análise da sensibilidade de seus parâmetros. No caso do SWAT, como o modelo apresenta diversos parâmetros de entrada, essa análise de sensibilidade se torna necessária para definir quais parâmetros afetam as respostas com maior intensidade, de modo a concentrar esforços e recursos no levantamento mais preciso desses parâmetros (JANSSEN; HEUBERGER, 1992).

A análise de sensibilidade pode ser realizada em escala local ou global. Em uma abordagem global, todos os dados de entrada são variados simultaneamente, permitindo o estudo de possíveis interações de mudanças em todos os parâmetros de entrada no resultado gerado pelo modelo. A análise de sensibilidade global é realizada usando algoritmos sofisticados construídos para essa finalidade. No entanto, por exigir múltiplas simulações, essa

técnica tem a desvantagem de requerer maior exigência computacional. Esse método facilita o processo de avaliação de inúmeros parâmetros, porém, um usuário inexperiente pode acabar suprimindo algumas propriedades relevantes para o sistema que está modelando (CARVALHO, 2014). Já na análise de sensibilidade local, a resposta do modelo é analisada variando cada parâmetro individualmente, enquanto se fixa os demais parâmetros. Em seguida, observa-se o efeito de cada alteração na saída e no desempenho do modelo, principalmente por meio da construção de análises gráficas. Esta é uma forma de análise rápida e com baixos requisitos computacionais, porém não é possível determinar se os parâmetros mantidos fixos são os mais adequados e qual a influência conjunta proveniente da alteração dos diversos parâmetros ao mesmo tempo (ARNOLD et al., 2012b).

Há que se considerar que modelos distribuídos como o SWAT são extremamente sensíveis a inúmeros parâmetros, sendo quase impossível a realização de análise de sensibilidade de forma manual (KANNAN et al., 2007). Em razão disso, Abbaspour (2015) sugere a utilização do *software* SWAT-CUP, que possibilita a realização de uma análise de sensibilidade em conjunto com a etapa de calibração do modelo, através de uma função objetivo. Nesse caso, um dado parâmetro é definido como sendo mais sensível e importante quando apresentar maiores variações no valor da função objetivo definida. Para definir o grau de importância de cada parâmetro, Van Griensven et al. (2006) sugere o emprego da classificação apresentada na Tabela 1.

Tabela 1- Influência da posição do parâmetro na análise de sensibilidade

Categoria	Posição do parâmetro
Muito importante	1
Importante	2 a 6
Ligeiramente importante	7 a 19
Sem importância	20 a 28

Fonte: Van Griensven et al. (2006).

Comumente, a etapa de calibração de um modelo inicia com a calibração dos processos hidrológicos e, em sequência, com a calibração dos processos sedimentológicos, isso porque o transporte de sedimentos em uma bacia está relacionado ao escoamento superficial. Ambos os processos consistem no ajuste dos parâmetros, de modo, que os resultados simulados concordem com as medições obtidas em campo (BECKERS; SMERDON; WILSON, 2009; ARNOLD et al., 2012b; NEITSCH et al., 2002, 2005, 2011).

A calibração pode ser realizada de duas formas: manual e/ou automática. A calibração manual é efetuada por meio de tentativas, de forma manual, variando-se um parâmetro por vez e simulando o modelo, até que os resultados simulados estejam próximos dos dados observados. Já a calibração automática baseia-se em técnicas de otimização computacional, utilizando-se os valores observados, em conjunto com funções objetivo (ARNOLD et al., 2012b; TUCCI, 2005).

Atualmente, umas das ferramentas disponíveis para realizar a calibração automática do modelo SWAT é o *software* SWAT-CUP. O SWAT-CUP oferece limites superiores e inferiores dos parâmetros a serem calibrados, os quais podem ser variados de três formas, sendo: por meio da substituição direta dos parâmetros; por adição de um valor constante ao parâmetro em cada nova tentativa de calibração ou ainda, por meio da multiplicação do parâmetro por um valor em porcentagem, variando para cima ou para baixo (ABBASPOUR, 2015).

No *software* estão disponíveis cinco algoritmos para a efetivação da calibração dos processos simulados, sendo eles: GLUE (Probabilidade Generalizada da Estimativa de Incerteza); MCMC (Métodos de Monte Carlo via Cadeias de Markov); ParaSol (Solução de Parâmetros); PSO (Método do enxame de partículas); e SUFI-2 (Sequencial de Montagem das Incertezas) (ABBASPOUR, 2015).

O SUFI-2 apresenta maior popularidade entre os usuários para a realização de parametrização, análise de sensibilidade, calibração, validação e análise de incerteza de parâmetros em simulações hidrossedimentológicas (ABBASPOUR; VEJDANI; HAGHIGHAT, 2007). Isso se deve à disponibilidade de muitos parâmetros relacionados à modelagem do balanço hídrico, ao processo de calibração mais fácil de ser realizado dentro de limites de tempo realizáveis, à melhor definição das incertezas associadas e; ao menor número de execuções computacionais requeridas para obtenção de boas estimativas e desempenho do modelo (KHOI; THOM, 2015; SHIVHARE; DIKSHIT; DWIVEDI, 2018).

Os parâmetros comumente modificados para determinação do escoamento superficial são: CN2 (valor inicial da Curva Número do escoamento superficial para a condição de umidade II); SOL_AWC (capacidade de água no solo na camada do solo); ESCO (fator de compensação da evaporação do solo); SURLAG (coeficiente de atraso do escoamento superficial); EPCO (fator de crescimento da cultura); e OV_N (coeficiente de rugosidade de Manning para escoamento na superfície). Já os parâmetros com maior influência no fluxo de base são: ALPHA_BF (regula o tempo de recarga do aquífero, representando o tempo necessário para a água atravessar a camada imediatamente abaixo da zona de raízes até chegar ao aquífero superficial) (ARNOLD et al., 2012b).

Ainda segundo Neitsch et al. (2005), os parâmetros CN2, ALPHA_BF, ESCO e SURLAG são sugeridos como os primeiros parâmetros a serem alterados para adequação do ajuste entre as vazões observadas e simuladas pelo modelo SWAT.

Nos processos para determinação da produção de sedimentos são usualmente definidos como sensíveis os parâmetros (ARNOLD et al., 2012b): PRF (fator de ajuste da taxa de pico para o aporte de sedimentos no canal principal); ADJ_PKR (fator de ajuste da taxa de pico para o aporte de sedimentos na sub-bacia); CH_COV (fator de cobertura vegetal do canal); CH_EROD (fator de erodibilidade do canal); LAT_SED (reflete a concentração de sedimentos no escoamento subsuperficial, que contribui para o canal principal); PRF (fator de ajuste da taxa de pico para o aporte de sedimentos no canal principal); SPCON (parâmetro linear para o cálculo da quantidade máxima de sedimentos que pode estar reentrando durante o aporte de sedimentos no canal); SPEXP(parâmetro exponencial para o cálculo da reentrada de sedimentos no aporte ao canal); USLE_C (valor mínimo do fator C de cobertura vegetal da USLE); USLE_K (fator K de erodibilidade do solo da USLE); e USLE_P (fator P de práticas de suporte da USLE); SLSOIL (comprimento da declividade para o escoamento subsuperficial); e SLOPE (rampa média adotada para todas as HRUs em uma sub-bacia).

Os resultados do processo de calibração podem ter interferência de uma série de fatores, entre os quais: os dados utilizados na calibração, as funções objetivo escolhidas e o método de otimização empregado (SOROOSHIAN; GUPTA, 1995).

Após alcançar a calibração satisfatória do modelo realiza-se a etapa de validação, para verificar a aplicabilidade futura do modelo (BECKERS; SMERDON; WILSON, 2009). O processo de validação configura-se na simulação do modelo usando os parâmetros já calibrados e uma série de dados observados ainda não utilizada na etapa de calibração. Os dados simulados são comparados com os dados observados, comumente por meio de análises gráficas e de índices estatísticos de eficiência (ARNOLD et al., 2012b).

3.4.1.2 Índices de eficiência para avaliação do desempenho de simulações com o modelo SWAT

Para avaliar o desempenho dos procedimentos de calibração e de validação de modelos hidrossedimentológicos são frequentemente utilizados índices estatísticos de eficiência, sendo os mais comuns: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS); o coeficiente de determinação (R^2); a tendência percentual (PBIAS); e o coeficiente de desvio padrão das observações (RSR) (ARNOLD et al., 2012b; MORIASI et al., 2007, MORIASI et al., 2015).

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) é um índice de desempenho que vem sendo amplamente utilizado como modo de avaliação de modelos hidrológicos (ALE et al., 2012). Seu valor varia de negativo infinito a um (1), sendo o valor um (1) indicativo de um ajuste perfeito, e valores menores do que zero indicativo de um desempenho inaceitável para o modelo. Quando o NS é inaceitável, o valor médio observado dos dados é considerado um melhor preditor do que o valor simulado pelo modelo (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1999). O NS pode ser calculado pela Equação 1 (NASH; SUTCLIFFE, 1970):

$$NS = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_{med}^{obs})^2 \right]} \quad (1)$$

Onde: n é o número total de dados observados; Y_i^{obs} é a i -ésima observação da variável avaliada; Y_i^{sim} é a i -ésima simulação da variável avaliada; e Y_{med}^{obs} é a média do conjunto de valores observados.

Outro índice que costuma ser utilizado em simulações hidrossedimentológicas é o coeficiente de determinação (R^2), apresentado na Equação 2. Esse índice varia entre 0 e 1, com $R^2=1$ representando o desempenho ótimo do modelo. Quanto menor o valor desse coeficiente, menor é a variação do erro (MORIASI et al., 2007, MORIASI et al., 2015).

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_{med}^{obs})(Y_i^{sim} - Y_{med}^{sim}))^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_{med}^{obs})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_{med}^{sim})^2} \dots \dots \dots \quad (2)$$

Onde: Y_{med}^{sim} é a média aritmética dos dados simulados pelo modelo.

A tendência percentual (PBIAS), calculada pela Equação 3, mede a tendência de os dados simulados serem maiores ou menores do que os dados observados, sendo seu valor ideal igual a zero (GUPTA et al., 1999). Valores de PBIAS positivos indicam que dados simulados estão superestimados em relação aos dados observados, enquanto que valores negativos informam dados subestimados (MORIASI et al., 2007, MORIASI et al., 2015).

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \quad (3)$$

Já o coeficiente de desvio padrão das observações (RSR) é a razão entre a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e o desvio padrão dos dados observados (STDEVobs), sendo determinado pela Equação 4. O RSR varia de um valor de zero até valores positivos elevados, sendo zero considerado o valor ótimo, ou seja, quanto mais próximo de zero, menor é o erro quadrático médio (MORIASI et al., 2007, MORIASI et al., 2015).

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV^{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_{med}^{obs})^2}} \quad (4)$$

A Tabela 2 apresenta um resumo das classificações de desempenho dos critérios propostos por Moriasi et al. (2007) e Moriasi et al. (2015) para a avaliação de processos hidrossedimentológicos, considerando os coeficientes estatísticos usualmente empregados e as quatro classes de desempenho propostas para classificação dos modelos.

Tabela 2 – Classificação de desempenho para simulação dos processos hidrossedimentológicos, considerando os índices estatísticos comumente utilizados

Critério de desempenho	Índices de Eficiência			
	Muito Bom	Bom	Satisfatório	Insatisfatório
Escoamento Vazão	NS > 0,80	0,70 < NS ≤ 0,80	0,50 < NS ≤ 0,70	NS ≤ 0,50
	PBIAS < ± 5	± 5 ≤ PBIAS < ± 10	± 10 ≤ PBIAS < ± 15	PBIAS > ± 15
	R ² > 0,85	0,75 < R ² ≤ 0,85	0,60 < R ² ≤ 0,75	R ² ≤ 0,60
	0,00 ≤ RSR ≤ 0,50	0,50 < RSR ≤ 0,60	0,6 < RSR ≤ 0,70	RSR > 0,70
Sedimentos	NS > 0,80	0,70 < NS ≤ 0,80	0,45 < NS ≤ 0,70	NS ≤ 0,45
	PBIAS < ± 10	± 10 ≤ PBIAS < ± 15	± 15 ≤ PBIAS < ± 20	PBIAS > ± 20
	R ² > 0,80	0,65 < R ² ≤ 0,80	0,40 < R ² ≤ 0,65	R ² ≤ 0,40

RSR, R² para sedimentos, NS para sedimentos: valores determinados para dados mensais.

Fonte: Adaptado de Moriasi et al. (2007) e de Moriasi et al. (2015).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo investigou a eficiência do modelo SWAT para simulação dos processos hidrossedimentológicos na bacia hidrográfica do Taboão/RS, procurando identificar as equações e os métodos para estimativas dos processos hidrológicos, de propagação do escoamento e de transporte de sedimentos nos canais, que resultam em melhor resposta para as saídas simuladas pelo modelo em relação a dados observados em campo. Nas análises foram consideradas diferentes resoluções temporais dos dados de entrada de precipitação.

4.1 ÁREA DE ESTUDO E CARACTERÍSTICAS FÍSICO-CLIMÁTICAS

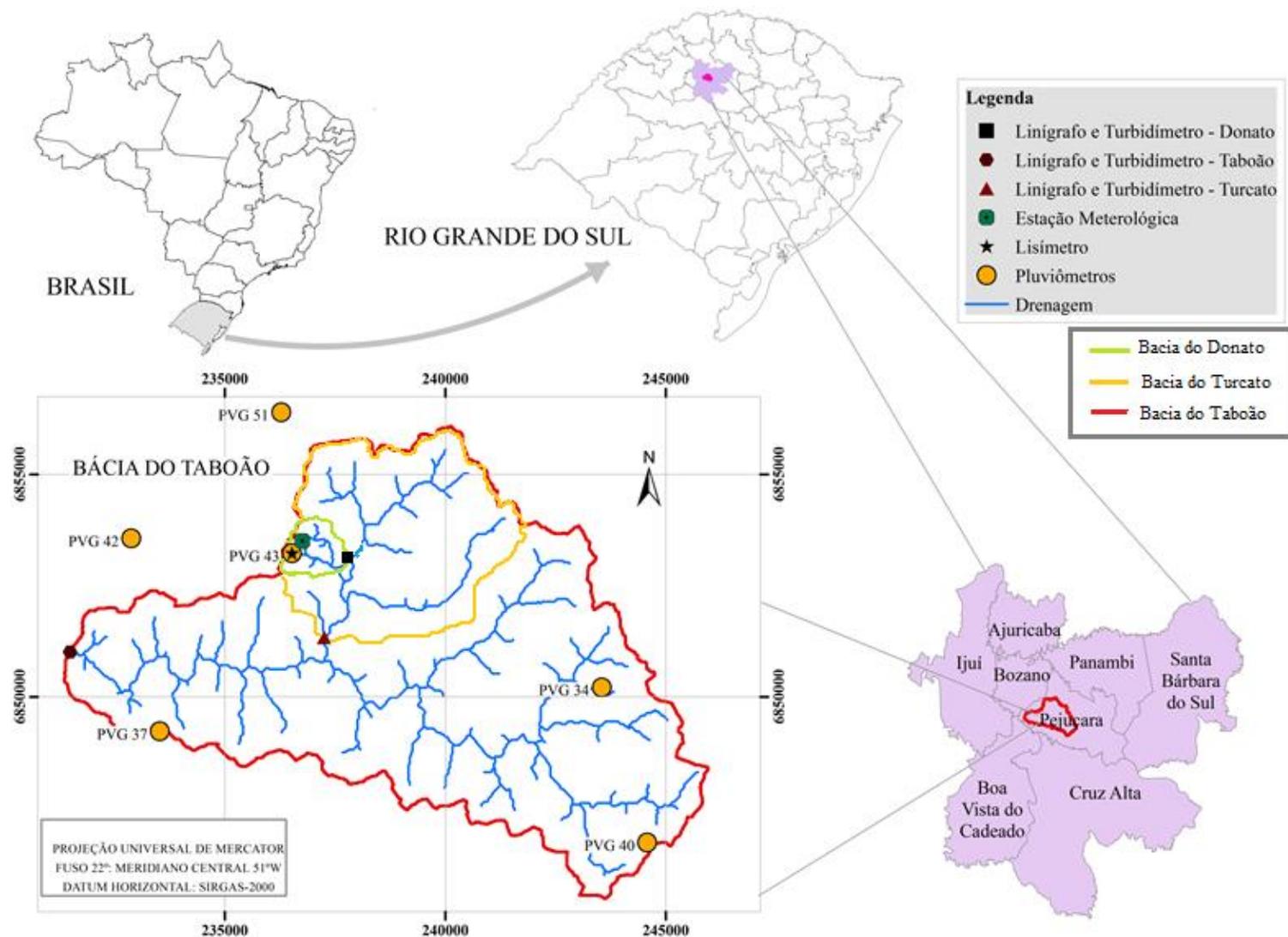
A bacia hidrográfica do Taboão localiza-se na região do Planalto Médio do Estado do Rio Grande do Sul, sobre o derrame basáltico sul-rio-grandense. A altitude máxima registrada é de 485 metros, com desníveis aproximados de 154 metros. Conforme Borges e Bordas (1988), a área do derrame basáltico compõe os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, com uma área total de 230.000 km².

Seu território abrange parte do município de Pejuçara, compreendendo uma área de aproximadamente 78 km² (Figura 3). Essa bacia faz parte da bacia hidrográfica do Rio Potiribu, cujo monitoramento é realizado desde 1989 pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) (SARI, 2017).

Segundo o sistema de classificação Koeppen, o clima na área em estudo é classificado como (cfa), mesotérmico brando do tipo temperado, super úmido e sem estação seca (NIMER, 1989). As precipitações na região são bem distribuídas ao longo do ano, sem identificação de um período de estiagem e com precipitação total média anual de 1700 mm (CHEVALLIER; CASTRO, 1991).

Conforme dados históricos (IPAGRO, 1989), a temperatura média do ar se diferencia entre 14 °C no mês de maio e 24 °C no mês de janeiro, com extremos de inverno abaixo de 0 °C e extremos de verão acima de 35 °C. A amplitude térmica é considerável, com temperatura máxima média de 32 °C no mês mais quente e temperatura mínima média de cerca de 8 °C no mês mais frio.

Figura 3 - Localização da bacia do Taboão e identificação dos pontos de monitoramento



Fonte: Sari (2017).

Ainda conforme dados históricos da região (IPAGRO, 1989), a evapotranspiração potencial média situa-se entre 2,3 mm/dia no mês de junho e 4,2 mm/dia no mês de dezembro, com um total anual de cerca de 1200 mm. A umidade relativa média do ar é de 69%, sendo a média do valor mais baixo de 65% no mês de dezembro, e do valor mais alto de cerca de 80%, no mês de julho. Já a radiação solar é mais intensa entre outubro e março, atingindo valores máximos entre os meses de novembro e janeiro.

4.2 CLASSES DE USO DO SOLO, TIPOS DE SOLOS E DECLIVIDADES PRESENTES NA BACIA DO TABOÃO/RS

O uso predominante do solo na bacia destina-se ao cultivo agrícola, com cerca de 80% a 85% das terras ocupadas pela agricultura extensiva, com predominância do cultivo de "plântio direto". O trigo e a aveia são as culturas mais comuns no inverno, e a soja e o milho são as culturas mais comuns no verão (Oliveira, 2006). As terras utilizadas para pastagem são menos significativas do que para a agricultura (VIERO, 2004).

Também estão presentes na bacia resquícios de florestas intermediárias, tropical/subtropical, composta por espécies arbóreas, arbustivas e rasteiras, as quais vêm sendo destruídas e substituídas por áreas agrícolas (CARVALHO et al., 1990). Comumente, essa vegetação caracteriza-se por áreas remanescentes de mata nativa, do tipo Mata Atlântica, ou em estágio avançado de regeneração, principalmente como fragmentos de mata ciliar e manchas isoladas variáveis de pequena extensão, além disso, em alguns trechos da bacia podem ser identificados plantios de araucária (VIERO, 2004; GIRARDI et al., 2011).

Na Figura 4 apresenta-se o mapa de uso do solo da bacia do Taboão, elaborado por Depiné (2014) e atualizado por Sari (2017). Na Tabela 3 são mostradas as nomenclaturas utilizadas no modelo SWAT para definição das classes de uso e de ocupação do solo, bem como o percentual de uso de cada solo em relação à área total da bacia (SARI, 2017).

Conforme levantamento do reconhecimento dos solos no estado do Rio Grande do Sul, os solos da bacia desenvolveram-se a partir de rochas eruptivas basálticas, sendo sua textura definida como argilosa, constituída por 70% de argila, 18% de silte, 7% de areia fina e 5% areia grossa (BRASIL, 1973). Ainda conforme a classificação da EMBRAPA (2006), na bacia são encontradas seis tipologias diferentes de solo, predominando o Neossolo Flúvico Tb Eutrófico (RYbe); Neossolo Litólico Eutrófico (RLe); Latossolo Vermelho Distrófico (LVd), subdividido em duas classes (LVd1 e LVd2); Latossolo Vermelho Distroférrico (LVdf), subdividido em três classes (LVdf1, LVdf2 e LVdf3); Nitossolo Vermelho Eutroférrico (NVef) e; Gleissolo

Háplico (GX).

Tabela 3 - Classificação do uso do solo presente na bacia do Taboão/RS para a modelagem no SWAT

Nomenclatura para modelagem	Classes de uso e ocupação do solo	Área total (%)
AGRL	agricultura genérica – cultivo anual	88,22
FRSE	floresta perene	7,75
PAST	pastagem	0,19
WATR	água	0,06
URHD	área residencial de alta densidade	2,32
URLD	área residencial de baixa densidade	0,30
UTRN	estradas	1,33

Fonte: Sari (2017).

Na Figura 5 apresenta-se o mapa pedológico da bacia hidrográfica do Taboão enquanto que, na Tabela 4 são descritos os percentuais de cada tipo de solo presentes.

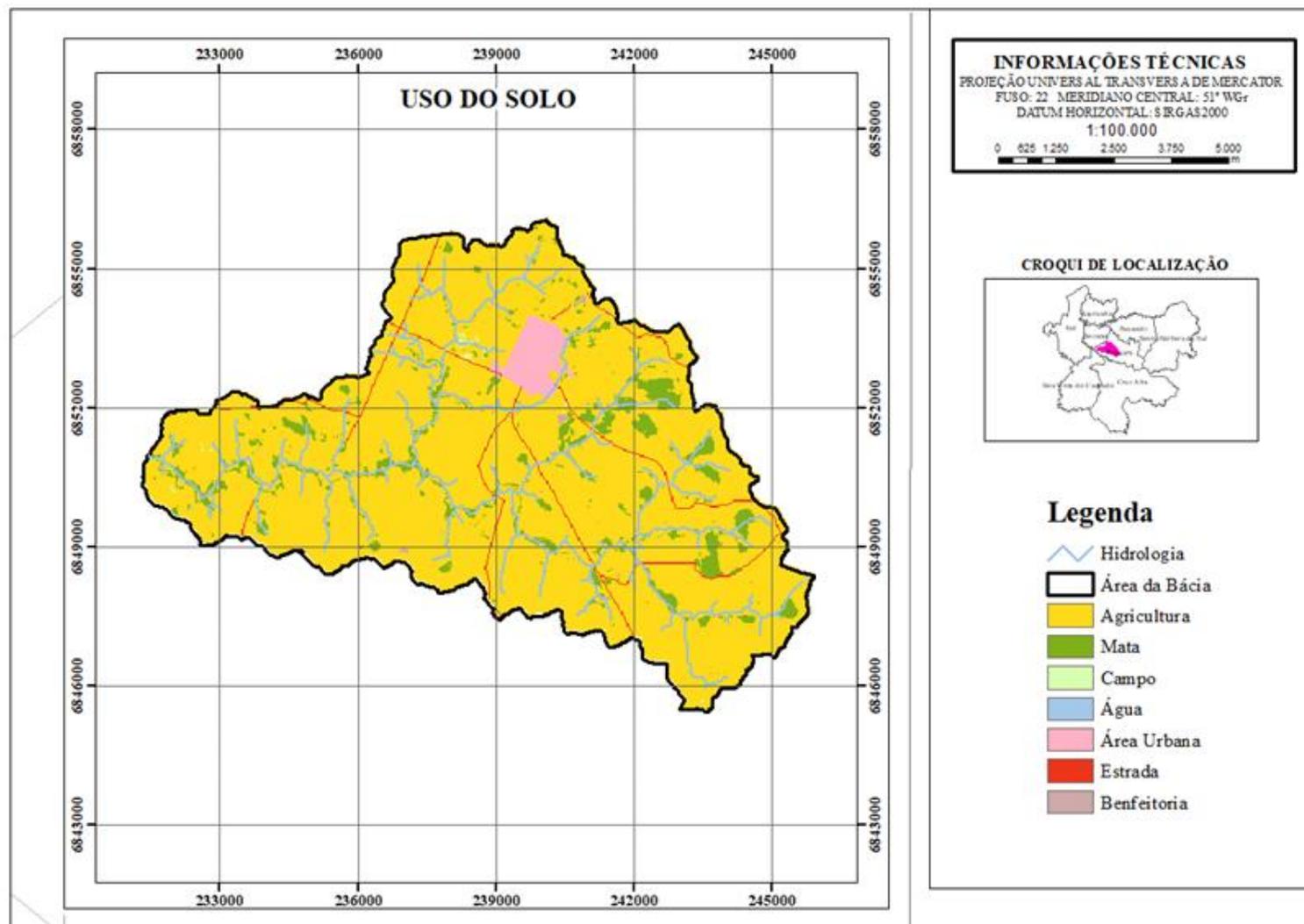
Tabela 4 - Classificação do tipo de solo presente na bacia do Taboão/RS para a modelagem no SWAT

Classes de solo	Tipo de solo	Área total (%)
LVd1	Latossolo Vermelho Distrófico típico	10,63
LVd2	Latossolo Vermelho Distrófico	24,44
LVdf1	Latossolo Vermelho Distroférico típico	4,72
LVdf2	Latossolo Vermelho Distroférico	24,85
LVdf3	Latossolo Vermelho Distroférico típico, A moderado	5,33
NVef	Nitossolo Vermelho Eutrófico	24,70
RYbe	Neossolos Flúvicos Tb Eutróficos	2,55
GX	Gleissolo Háplico	2,42
RLe	Neossolo Litólico Eutrófico	0,35

Fonte: Sari (2017).

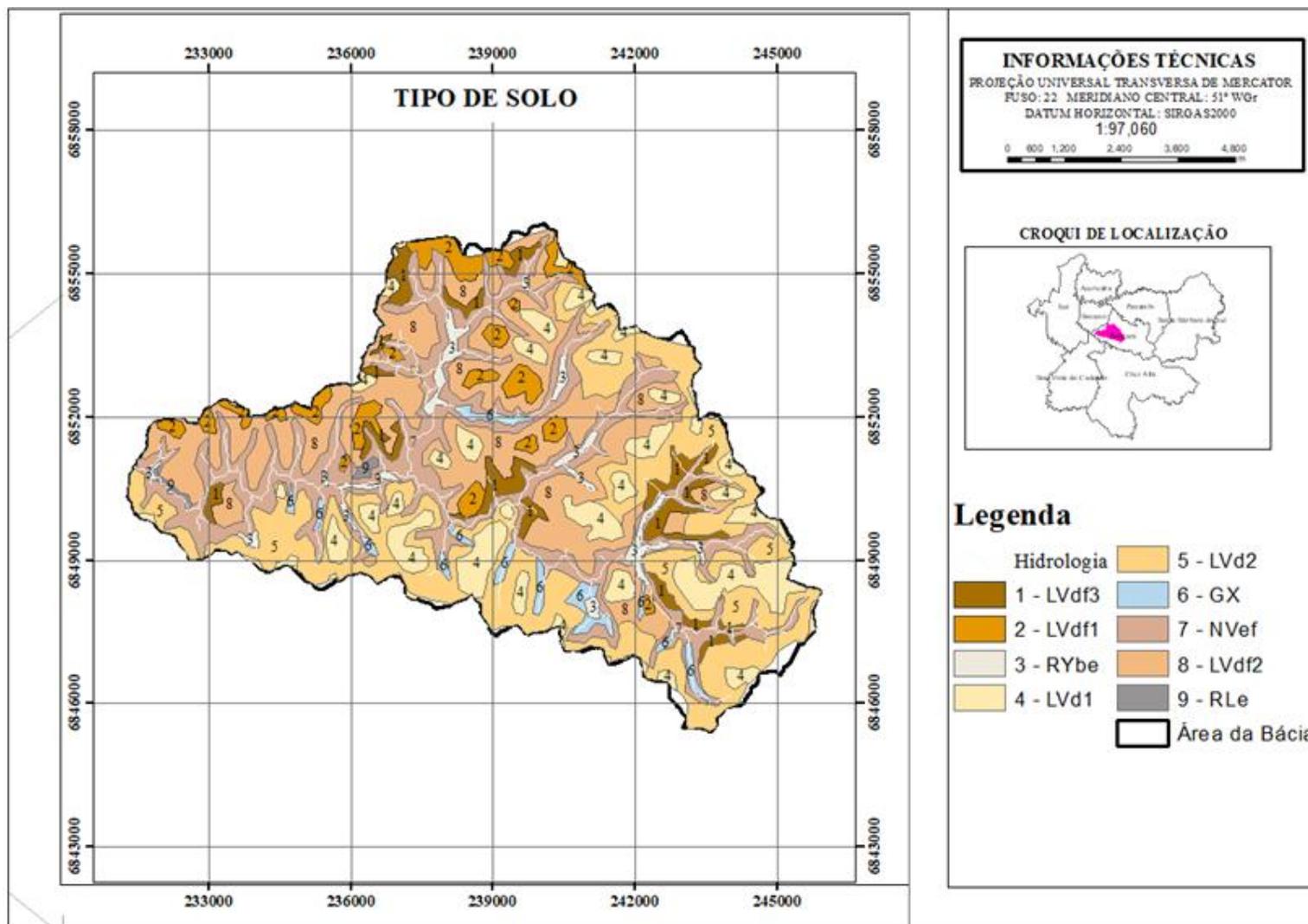
A bacia hidrográfica do Taboão tem seu eixo principal orientado para a direção NW e possui uma forma alongada. Sua altimetria varia de 340 a 485 metros (Figura 6). As altitudes mais elevadas são encontradas no extremo leste da bacia e a densidade de drenagem presente é considerada baixa (1,54) (DINIZ, 2001). A topografia da bacia foi subdividida em cinco classes de declividade para análises no modelo SWAT: classe 1 (de 0 até 5%), classe 2 (acima de 5 até 8%), classe 3 (acima de 8 até 20%), classe 4 (acima de 20 até 45%) e classe 5 (acima de 45%) (SARI, 2017).

Figura 4 - Mapa de uso do solo da bacia do Taboão/RS



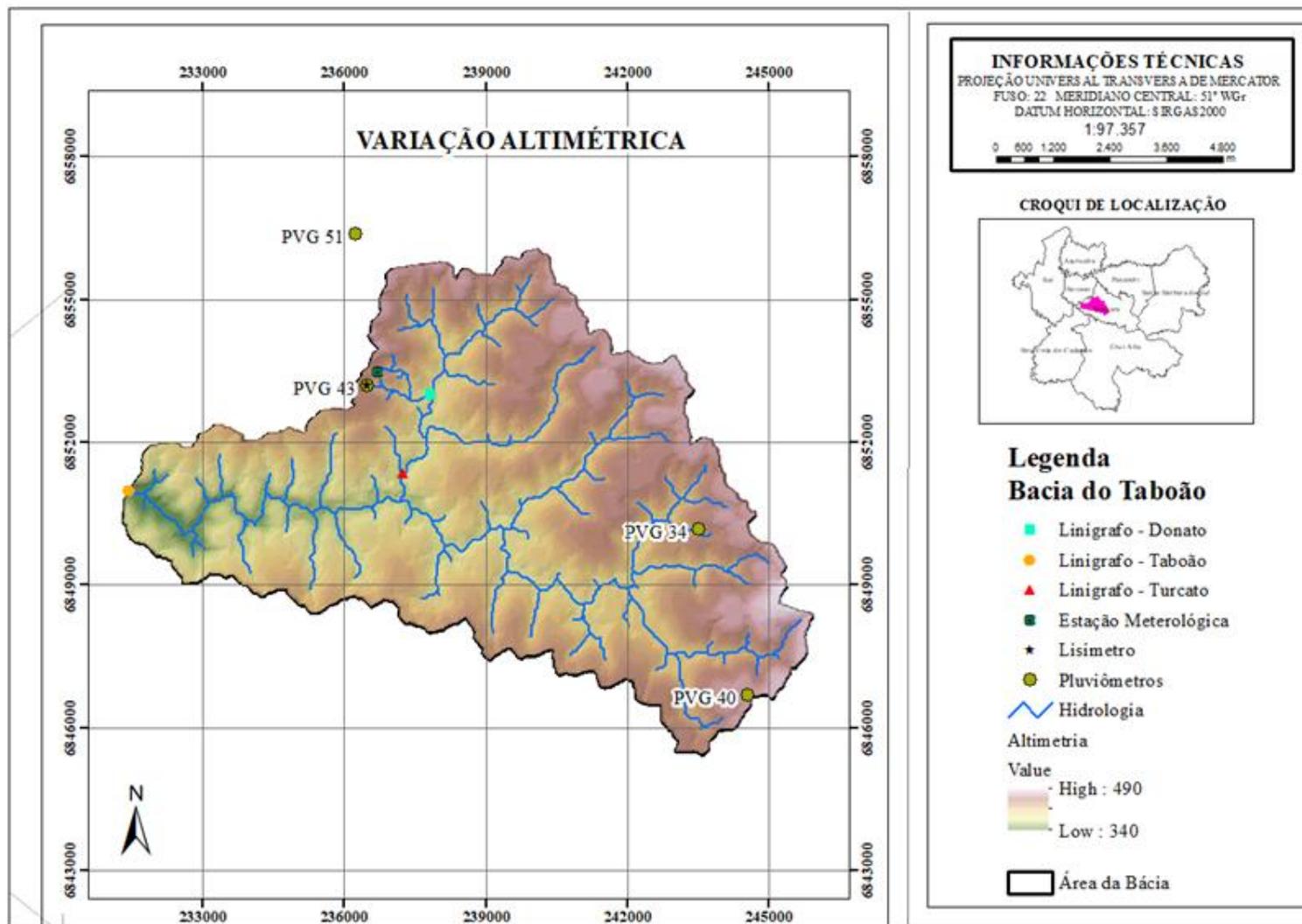
Fonte: Sari (2017, adaptado de Depiné, 2014).

Figura 5 - Mapa pedológico da bacia do Taboão/RS



Fonte: Sari (2017, adaptado de Depiné, 2014).

Figura 6 - Mapa altimétrico da bacia do Taboão



Fonte: Sari (2017, adaptado de Depiné, 2014).

A declividade média da bacia é de 8%, embora nos vales possa variar de 10% a 20%. Localmente, na parte sudoeste da bacia, são encontradas encostas mais íngremes, com declividades variando de cerca de 30% a até 45% (VIERO, 2004).

4.3 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS NO MODELO SWAT

Para a simulação dos processos hidrossedimentológicos pelo modelo SWAT são necessários dados geográficos e cartográficos (mapas de uso do solo, tipos de solos e um modelo numérico do terreno), dados tabulares (séries temporais de precipitação, temperatura do ar máxima e mínima, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar) e também, dados sintéticos. Além disso, também são necessários parâmetros relacionados aos solos, ao ciclo hidrológico, ao escoamento superficial, aos processos erosivos e à produção de sedimentos, etc.

Os dados da bacia utilizados nessa pesquisa (precipitação, vazão, produção de sedimentos, mapas da bacia, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar, parâmetros físicos da bacia, etc.) foram cedidos pelo IPH/UFRGS, obtidos no Projeto Potiribu, gerenciado pela Profa. Dra. Nilza Maria dos Reis Castro.

Nas simulações realizadas considerou-se o período de dados de 2011 a 2016. Foram realizadas:

- Calibração e validação do modelo SWAT para estimativa de vazão na bacia hidrográfica do Taboão, considerando o emprego de diferentes equações de evapotranspiração (Hargreaves e Penman-Monteith) e dados de entrada diários de precipitação, associados ao modelo de infiltração da Curva Número e a diferentes métodos de propagação do escoamento nos canais fluviais (Muskingum-Cunge e Variação do Armazenamento);
- Calibração e validação do modelo SWAT para estimativa de vazão na bacia hidrográfica do Taboão, considerando o emprego de diferentes equações de evapotranspiração (Hargreaves e Penman-Monteith) e dados de entrada horários de precipitação, associados ao modelo de infiltração Green & Ampt e a diferentes métodos de propagação do escoamento nos canais fluviais (Muskingum-Cunge e Variação do Armazenamento);
- Calibração e validação dos modelos verificados como de melhor previsão da vazão para a estimativa da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Taboão, considerando o uso de diferentes métodos de transporte de sedimentos no canal (Bagnold e Yang).

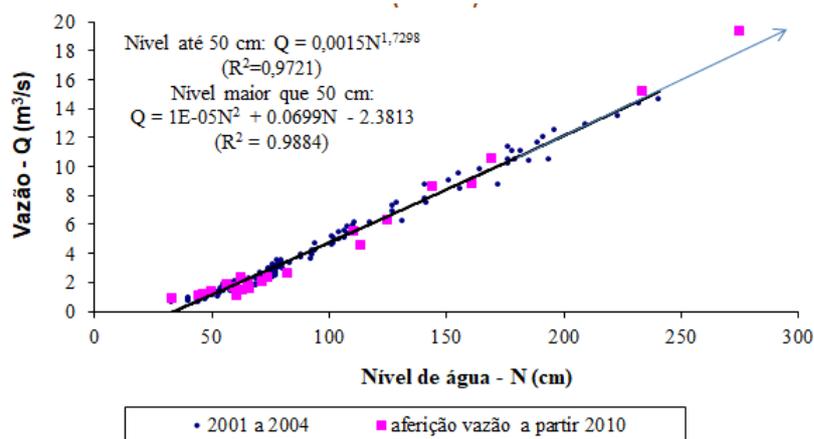
Na calibração da vazão e da produção de sedimentos, os parâmetros de entrada identificados como mais sensíveis para as variáveis foram ajustados com o apoio do *software* SWAT-CUP, utilizando o algoritmo SUFI-2. As principais equações, parâmetros de entrada e processos usadas na rotina do modelo SWAT para estimar processos hidrossedimentológicos podem ser encontradas na literatura específica sobre o modelo: Neitsch et al. (2002, 2005, 2010, 2011) e Arnold et al. (2012a).

O desempenho do modelo para a simulação dos processos hidrossedimentológicos foi analisado por meio dos índices estatísticos NS, R², PBIAS e RSR, conforme equações 1 a 4, além de análises gráficas. A eficiência observada foi classificada conforme critérios apresentados na Tabela 2.

4.3.1 Monitoramento do nível de água e determinação da vazão no exutório da bacia do Taboão

Os registros de nível de água disponíveis foram monitorados no exutório da bacia do Taboão (coordenadas: 231507E m e 6851032N m, zona 22J), por meio de um linígrafo com sensor boia (OTT Thalimedes com Data logger embutido), que registra o nível da água a cada 10 minutos. As medidas foram convertidas em vazão através da curva-chave do exutório da bacia (Figura 7), desenvolvida a partir de monitoramentos realizados pela equipe do Projeto Potiribu, do IPH/UFRGS (SARI, 2017).

Figura 7 - Curva-chave para determinação da vazão em função da variação do nível de água, na bacia do Taboão



Fonte: Curva elaborada pela equipe do Projeto Potiribu a partir de monitoramentos realizados in situ, para o período compreendido entre 2001 e 2010 (inclusive) (Sari, 2017).

O grupo do Projeto Potiribu realiza medições periódicas (mensais) de vazão para analisar possíveis modificações nesta curva, ocorridas por mudanças na seção monitorada. Essas medições são realizadas por meio de Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP S5, da Sontek), que possibilita verificações com lâminas de água entre 30 cm e 6 m e também, com molinete hidrométrico. A partir do ano de 2020 foi verificada uma modificação na seção monitorada, havendo necessidade de readequação da curva-chave com novas medições. Em razão disso, os dados desse período em diante não foram considerados nessa pesquisa.

Dessa forma, os dados de vazão utilizados para calibração e validação dos processos hidrossedimentológicos no modelo SWAT estão compreendidos entre 2011 e 2016, tendo sido obtidos por cálculo dos valores médios diários, determinados a partir das leituras de 10 minutos do nível de água e da conversão em vazão pela equação da curva-chave.

4.3.2 Precipitação e dados climáticos requeridos para simulação do modelo SWAT

Os dados pluviométricos utilizados nessa pesquisa (2011 a 2016) foram obtidos de quatro pluviômetros (PVGs 34, 40, 43 e 51), tipo báscula (Marca Davis), instalados na área da bacia (Figura 3; Tabela 5). As informações registradas possuem resolução de 10 minutos e foram acumuladas para outros intervalos de tempo, conforme análises pretendidas (diária ou subdiária). Eventualmente, na ausência de informações desses pluviômetros, foram utilizados como complemento os dados da estação climatológica instalada na bacia.

Tabela 5 - Coordenadas e altitude dos pluviômetros e da estação climatológica

Pluviômetro	Latitude Sul (graus)	Longitude Oeste (graus)	Altitude (m)
PVG 34	-28,457	-53,605	470
PVG 40	-28,481	-53,609	470
PVG 43	-28,420	-53,689	440
PVG 51	-28,393	-53,692	470
Estação climatológica (PVG 13)	-28,418	-53,687	440

Fonte: Sari (2017).

Para simular os processos hidrossedimentológicos com o modelo SWAT também são necessárias informações e parâmetros adicionais, relacionados à precipitação do local, sendo esses retirados do estudo realizado por Sari (2017). Os parâmetros são: média mensal da precipitação total; desvio padrão para a precipitação diária do mês; coeficiente de assimetria para a precipitação diária por mês; probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos para o

mês; probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos para o mês; média mensal de dias de precipitação no mês e; valor máximo de 0,5 h de chuva em todo o período de registros do mês.

Sari (2017) utilizou os registros diários de precipitação da série histórica compreendida entre 01/09/1989 e 31/12/2016 para calcular os parâmetros de precipitação média mensal, necessários para o banco de dados do modelo SWAT. Esses parâmetros foram calculados pela autora com base na descrição das variáveis e nas equações apresentadas em Neitsch et al. (2005, 2010, 2011).

O máximo de precipitação de 30 minutos (0,5 horas), necessário para obter o parâmetro RAINHHMX, também foi determinado por Sari (2017). Esse valor foi calculado pelo método indireto, por meio dos dados horários de precipitação e dos "coeficientes de desagregação de chuvas" (CETESB, 1980), disponibilizados para todo o território nacional.

Na Tabela 6 são apresentadas as informações dos dados médios mensais referentes à precipitação, requeridos pelo modelo SWAT.

Tabela 6 - Dados médios mensais utilizados no modelo SWAT

Mês	PCPMM	PCPSTD	PCPD	PR_W1	PR_W2	PCPSKW	RAINHHMX
Janeiro	152,513	72,466	21,694	0,382	0,816	1,142	31,684
Fevereiro	111,318	63,027	21,380	0,318	0,831	2,417	24,495
Março	115,529	45,722	21,713	0,315	0,800	0,679	25,518
Abril	132,403	47,542	20,259	0,358	0,774	0,351	30,947
Maio	135,401	74,503	22,843	0,322	0,825	2,120	41,116
Junho	133,914	47,505	22,120	0,362	0,814	0,078	29,084
Julho	134,065	33,754	21,917	0,314	0,768	0,194	30,537
Agosto	100,262	47,729	20,278	0,324	0,735	0,532	28,714
Setembro	142,222	62,394	20,080	0,396	0,726	0,591	33,844
Outubro	201,379	74,119	20,929	0,383	0,776	2,013	36,888
Novembro	124,910	60,362	18,375	0,309	0,695	1,088	28,061
Dezembro	142,470	58,068	20,375	0,429	0,728	0,820	34,323

Onde: PCPMM - média mensal da precipitação total (mm); PCPSTD - desvio padrão para a precipitação diária do mês (mm); PCPD - média mensal de dias de precipitação no mês (dias); PR_W1 - probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos para o mês; PR_W2 - probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos para o mês; PCPSKW - coeficiente de assimetria para a precipitação diária por mês e; RAINHHMX - valor máximo de 0,5 h de chuva em todo o período de registros do mês (mm).

Fonte: Sari (2017).

Outra entrada de dados requerida pelo modelo SWAT para a realização das simulações são séries climáticas diárias. Tais dados foram obtidos da estação climatológica administrada pelo INMET, localizada no município de Cruz Alta (código 02853005, coordenadas: 28°36' S e 53°40' W; UTM: 238553 m E, 6833021 m N, zona 22J), na altitude 432 m e com uma distância de 18 km da região de Pejuçara (SARI, 2017). Os dados considerados correspondem ao período

de 2011 a 2016, sendo que os anos 2011 e 2012 foram utilizados apenas para o aquecimento do modelo, não sendo considerados na análise final dos processos hidrossedimentológicos. Foram empregados dois anos de período de aquecimento, uma vez que uma análise preliminar indicou que a utilização desse intervalo temporal resultou em desempenho superior em comparação com a adoção de apenas um ano.

Além disso, para a alimentação do banco de dados do modelo, também são requeridos parâmetros de entrada como: média mensal de temperatura máxima diária, média mensal de temperatura mínima, desvio padrão para a temperatura máxima diária de cada mês, desvio padrão para a temperatura mínima diária de cada mês, média diária de radiação solar para cada mês, média diária da temperatura do ponto de orvalho para cada mês e média diária da velocidade do vento para cada mês. Tais informações foram calculadas por Sari (2017) utilizando a série histórica do período de 01/09/1989 até 31/12/2016, conforme descrições e equações apresentadas em Neitsch et al. (2005, 2010, 2011). Na Tabela 7 são apresentados os dados climáticos médios mensais.

Tabela 7 - Dados climáticos médios mensais utilizados no modelo SWAT

Mês	DEWPT	SOLARAV	WDAV	TMPMX	TMPMN	TMPSTDMX	TMPSTDMN
Janeiro	19,181	19,032	1,674	29,848	18,742	0,891	0,805
Fevereiro	19,467	17,670	1,709	29,049	18,448	1,444	0,966
Março	18,368	15,431	1,711	28,110	17,229	1,394	1,071
Abril	15,737	11,538	1,693	25,555	14,663	1,355	0,995
Mai	12,814	8,796	1,577	21,371	11,547	1,387	1,326
Junho	11,586	6,368	1,712	19,478	10,002	1,378	1,619
Julho	10,284	7,722	1,768	18,570	9,030	1,869	1,769
Agosto	11,693	9,831	1,857	21,446	10,645	1,658	1,650
Setembro	12,628	11,369	2,044	21,952	11,654	1,875	1,282
Outubro	15,050	12,964	2,135	24,962	14,191	1,727	1,229
Novembro	15,577	17,881	2,155	27,613	15,881	1,742	1,235
Dezembro	17,815	18,943	1,905	29,410	18,238	1,837	1,176

Onde: DEWPT - média diária do ponto de orvalho para cada mês (°C); SOLARAV - média diária de radiação solar para cada mês (MJ/m²/dia); WDAV - média diária da velocidade do vento para cada mês (m/s); TMPMX - média mensal de temperatura máxima diária (°C); TMPMN - média mensal de temperatura mínima diária (°C); TMPSTDMX - desvio padrão para a temperatura máxima diária de cada mês (°C) e; TMPSTDMN - desvio padrão para a temperatura mínima diária de cada mês (°C).

Fonte: Sari (2017).

4.3.3 Determinação da produção de sedimentos no exutório da bacia do Taboão

A produção de sedimentos diária, utilizada para a calibração no *software* SWAT-CUP, foi determinada utilizando a metodologia proposta por Sari, Castro e Pedrollo (2017) e Teixeira et al. (2020).

Sari, Castro e Pedrollo (2017) empregaram modelos de Redes Neurais Artificiais (RNAs), que utilizam informações de turbidez e de nível de água, para determinar séries contínuas de CSS de intervalo de 10 minutos, no período compreendido entre 2013 e 2015. O modelo proposto apresentou ótimo desempenho ($NS_{trein.} = 0,930$; $NS_{verific.} = 0,953$). Esses dados de CSS foram utilizados em conjunto com os dados de vazão média de 10 minutos, estimados por meio da curva-chave da bacia, para determinação da produção de sedimentos de 10 minutos. A produção diária de sedimentos foi então calculada pelo somatório das produções de sedimentos de 10 minutos que compõem o dia (SARI, 2017).

Para o período de 2016 a 2019, o sensor de turbidez instalado no exutório da bacia apresentou problemas operacionais, impossibilitando o uso do modelo de RNA para determinação da produção de sedimentos. Dessa forma, a produção de sedimentos diária para o período de 2016 a 2018 foi calculada a partir do modelo proposto por Teixeira et al. (2020). Os autores estimaram a CSS por meio de um modelo RNA, que utiliza como entrada duas variáveis: a área da bacia e a média móvel exponencialmente ponderada de chuvas anteriores (EWMA). O modelo proposto apresentou ótima eficiência na previsão da CSS, alcançando $NS_{trein.} = 0,867$ no treinamento da RNA, e $NS_{verific.} = 0,956$ na verificação (Teixeira et al., 2020). A produção diária de sedimentos foi determinada por meio dos valores médios diários da CSS e da vazão diária.

4.3.4 Características físico-hídricas do solo requeridas pelo modelo SWAT

As características físico-hídricas das diferentes classes de solo presentes na bacia (Tabela 8), necessárias para entrada no banco de dados do modelo SWAT, foram retiradas do estudo realizado por Depiné (2014).

A autora estimou os parâmetros tendo por base descrições encontradas nas literaturas existentes, ensaios práticos realizados no local e também, pela calibração dos parâmetros diretamente no modelo SWAT. Maiores detalhes sobre a obtenção desses dados podem ser verificados no trabalho de Depiné (2014).

Tabela 8 - Características físico-hídricas das classes de solo presentes na bacia do Taboão

Classes	LVd1	LVd2	LVdf1	LVdf2	LVdf3	Nvef	Rybe	GX	RE
nlayers	4	4	4	4	4	3	4	4	4
hygrp	A	A	B	B	B	B	B	B	B
sol_zmx	3000	3000	3500	3500	3500	3500	3500	3000	3000
anion_excl	0,3	0,38	0,38	0,38	0,5	0,32	0,37	0,5	0,33
sol_z1	250	250	300	300	300	300	250	180	230
sol_bd1	1,6	1,64	1,62	1,71	1,31	1,73	1,28	1,52	1,37
sol_awc1	0,56	0,6	0,92	0,67	0,97	0,4	0,73	0,85	1,4
sol_k1	285	195	161	65	41	265	101	145	161
sol_cbn1	0,8	1,08	1,31	2,26	1,72	1,3	1,7	2,35	1,7
clay1	54,6	51,3	59,2	43,5	60,5	59,9	47,3	44,8	35
silt1	12,7	15,3	23,3	2,7	21	21,4	24,4	22,5	12
sand1	31,6	33,4	17,5	33,8	18,5	18,7	28	32,7	48
rock1	1,1	0	0	0	0	0	0,3	0	5
sol_alb1	0,15	0,15	0,15	0,13	0,23	0,18	0,16	0,16	0,16
usle_k1	0,0991	0,0967	0,1129	0,1091	0,1045	0,1057	0,1097	0,1082	0,1049
sol_ec1	0	0	0	0	0	0	1	0	1
sol_z2	700	700	1000	1000	1000	900	1000	600	1000
sol_bd2	1,41	1,5	1,52	1,63	1,29	1,62	1,27	1,47	1,55
sol_awc2	0,86	0,8	0,92	0,67	0,95	0,6	0,75	0,6	1,2
sol_k2	260	202	100	50	40	126	48	69	31
sol_cbn2	1,13	1,18	1	1,55	1,3	0,68	1,43	0,54	0,54
clay2	55,3	64,9	70	65	56	70,2	57,7	47,3	46,5
silt2	12,2	11	14,7	16	23	16,4	24,5	22,6	12,7
sand2	32,5	24,1	15,3	18,5	21	13,3	16,8	29,8	30,8
rock2	0	0	0	0,5	0	0,1	1	2,2	10
sol_alb2	0,15	0,15	0,15	0,13	0,23	0,15	0,16	0,16	0,16
usle_k2	0,0995	0,1055	0,1212	0,1106	0,1176	0,1246	0,1108	0,1389	0,1223
sol_ec2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sol_z3	1500	1500	2000	2000	2000	3500	2000	1500	2000
sol_bd3	1,51	1,47	1,52	1,5	1,29	1,49	1,19	1,37	1,75
sol_awc3	0,56	0,7	1,05	0,84	0,88	0,6	0,35	0,61	1,4
sol_k3	190	150	77	30	19	143	0,45	78	31
sol_cbn3	0,95	0,72	0,54	0,95	1,08	0,4	1,43	0,27	1,3
clay3	57,3	68,1	72,3	48,9	56,6	78	57,2	54,4	37,6
silt3	9,9	11,9	16,5	29,6	22,4	12	21,3	18,9	17,1
sand3	32,5	20	11,2	21,5	21	10	21,5	26,7	35,3
rock3	0,3	0	0	0	0	0	0	0	10
sol_alb3	0,15	0,15	0,15	0,13	0,23	0,15	0,16	0,16	0,16
usle_k3	0,0979	0,1117	0,1351	0,147	0,1258	0,1252	0,1146	0,1332	0,1349
sol_ec3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sol_z4	3000	3000	3500	3500	3500		3500	3000	3000
sol_bd4	1,4	1,37	1,7	1,47	1,28		1,19	1,37	1,4
sol_awc4	0,5	0,75	1,05	0,94	0,93		0,35	0,61	1,4
sol_k4	80	159	87	34	21		0,45	78	31
sol_cbn4	0,4	0,54	0,45	0,63	0,86		1,43	0,27	0,54
clay4	57,6	68	71,4	48,5	56,6		57,2	54,4	37,6
silt4	9,9	12	15,7	29,6	22,4		21,3	17,9	17,1
sand4	32,5	20	11,2	21,9	21		21,5	27,7	35,3
rock4	0	0	1,7	0	0		0	0	10
sol_alb4	0,15	0,15	0,15	0,13	0,23		0,16	0,16	0,16
usle_k4	0	0	0	0	0		0	0	0
sol_ec4	0	0	0	0	0		0	0	0

NLAYERS: número de camadas, HYDGRP: grupos de saturação (A, B, C ou D), SOL_ZMX: profundidade máxima da raiz (mm), ANION_EXCL: porosidade, SOL_Z: profundidade da camada de solo (mm), SOL_BD: densidade aparente (mg/m³ ou g/cm³), SOL_AWC: capacidade de água no solo, SOL_K: condutividade hidráulica saturada (mm/h), SOL_ALB: albedo, SOL_CBN: carbono orgânico (%), USLE_K: erodibilidade [(0,013ton/m²/hr)/(m³/ton/cm)], CLAY: porcentagem de argila (%), SILT: porcentagem de silte (%), SAND: porcentagem de areia (%) e ROCK: porcentagem de pedras (%)

Fonte: Sari (2017, adaptada de Depiné, 2014).

4.3.5 Cenários Simulados

O período empregado para calibrar a vazão no *software* SWAT-CUP abrangeu os anos de 2013 (início em março), 2014 e 2016, com os anos de 2011 e 2012 sendo utilizados para o processo inicial de aquecimento. Isso se revelou essencial devido às incertezas significativas que estavam presentes no início da simulação, principalmente relacionadas à falta de informações precisas sobre as condições iniciais, como a umidade do solo (DURÃES, 2010). O ano de 2015, por sua vez, foi reservado para a fase de validação. Optou-se por utilizar o ano de 2016 para o processo de calibração em detrimento do ano de 2015, em razão da observação de uma precipitação significativamente inferior neste último período (1388,75 mm), em comparação com os anos de 2014 (1838,63 mm) e 2015 (1727,16 mm). Essa escolha foi motivada pela obtenção de uma média mais consistente ao incorporar dados provenientes dos anos de 2014 e 2016 para a calibração do modelo.

No que diz respeito à calibração dos sedimentos, foram alocados dois anos para esse processo - especificamente, 2013 e 2015 - sendo precedidos por dois anos de aquecimento (2011 e 2012). Quanto à validação da simulação de sedimentos, os anos selecionados para essa finalidade foram 2014 e 2016.

Inicialmente, o módulo hidrológico do modelo passou por um processo de calibração. Após a conclusão dessa fase, a validação do módulo foi realizada utilizando apenas um ano da série histórica. Com essa etapa finalizada, a atenção se voltou para a calibração do módulo sedimentológico, e, por fim, para sua validação. Na Tabela 9, estão descritos os cenários simulados utilizando equações distintas.

Tabela 9 – Cenários simulados com diferentes equações

Simulações	Modelo de infiltração	Equação de evapotranspiração	Método de propagação do escoamento	Método de transporte de sedimentos no canal
SIM 1	CN	Penman-Monteith	<i>Variable Storage</i>	Bagnold
SIM 2	CN	Hargreaves	<i>Variable Storage</i>	Bagnold
SIM 3	CN	Penman-Monteith	Muskingum	Bagnold
SIM 4	CN	Hargreaves	Muskingum	Bagnold
SIM 5	CN	Penman-Monteith	<i>Variable Storage</i>	Yang
SIM 6	CN	Hargreaves	<i>Variable Storage</i>	Yang
SIM 7	CN	Penman-Monteith	Muskingum	Yang
SIM 8	CN	Hargreaves	Muskingum	Yang
SIM 9	GA	Penman-Monteith	<i>Variable Storage</i>	Bagnold
SIM 10	GA	Hargreaves	<i>Variable Storage</i>	Bagnold
SIM 11	GA	Penman-Monteith	Muskingum	Bagnold
SIM 12	GA	Hargreaves	Muskingum	Bagnold
SIM 13	GA	Penman-Monteith	<i>Variable Storage</i>	Yang
SIM 14	GA	Hargreaves	<i>Variable Storage</i>	Yang
SIM 15	GA	Penman-Monteith	Muskingum	Yang
SIM 16	GA	Hargreaves	Muskingum	Yang

Onde: CN – Curva Número; GA – Green Ampt.

Fonte: Autora (2023).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seção a seguir analisa os resultados obtidos da simulação de processos hidrossedimentológicos, utilizando o modelo SWAT e o *software* SWAT-CUP. Métodos de infiltração de Green & Ampt e da Curva Número foram utilizados, considerando diferentes equações de evapotranspiração e diferentes métodos de propagação do escoamento em canais fluviais. Já para a estimativa da produção de sedimentos na bacia considerou-se o uso de diferentes métodos de transporte de sedimentos no canal (Bagnold e Yang). Ao final, foi realizada uma comparação dos resultados desta pesquisa com outros estudos que utilizaram o modelo SWAT ou que foram conduzidos na mesma área de estudo.

5.1 ESTATÍSTICAS DOS DADOS OBSERVADOS NA BACIA DO TABOÃO: PRECIPITAÇÃO, VAZÃO E SEDIMENTOS

Na Tabela 10 são detalhados os valores diários máximos, médios e mínimos para cada ano empregado nas simulações executadas com os modelos SWAT e *software* SWAT-CUP na bacia do Taboão. Esta tabela fornece uma descrição abrangente das variáveis de interesse, incluindo precipitação, vazão e produção de sedimentos.

Tabela 10 - Estatísticas diárias das variáveis precipitação, vazão e produção de sedimentos na bacia do Taboão

Variável	Estatística	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Precipitação diária (mm)	máxima	104,80	66,00	51,60	118,00	93,40	89,10
	média	4,48	2,27	3,26	4,93	4,73	3,64
	mínima	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Vazão (m ³ /s)	máxima	17,71	10,19	8,05	18,85	15,86	22,73
	média	2,46	1,40	2,15	3,56	3,33	2,52
	mínima	0,68	0,45	1,06	0,95	1,06	0,34
Produção de sedimentos (t/dia)	máxima	1305,03	462,4	414,89	1609,56	1283,22	2202,22
	média	41,39	10,89	18,45	51,63	50,18	32,67
	mínima	2,81	1,73	4,07	3,65	4,06	3,44

Fonte: Autora (2023).

Ao analisar a Tabela 10 percebe-se que todos os processos na bacia estão interligados. As estatísticas demonstram valores mais elevados de precipitação média diária para o ano de 2014, seguido dos anos de 2015 e 2011, sendo o máximo diário observado em 2014. De modo geral, as vazões médias diárias seguem tendência semelhante, com maiores valores registrados

em 2014 e 2015 e menores em 2012, com máximo diário observado em 2016. Já a produção de sedimentos diária média foi maior nos anos de 2014 e 2015, entretanto, o maior valor observado ocorreu no ano de 2016. Isso demonstra que os processos não ocorrem de forma linear na bacia, sendo influenciados por processos complexos relacionados ao uso do solo e práticas de manejo, além da intensidade dos eventos de precipitação e das condições de umidade antecedente. O ano de 2012, por exemplo, representou um período de seca elevada na bacia, o que justifica as menores produções de sedimentos e vazões observadas no período.

Em estudo realizado por Peixoto et al. (2020) na Bacia Hidrográfica do Rio Jordão, os autores destacaram que durante a estação chuvosa, as concentrações de sedimentos foram significativamente mais elevadas em comparação com o período de estiagem, o que evidencia a influência direta da precipitação na carga sedimentar do rio Jordão. É plausível, pois, inferir que um padrão semelhante possa estar ocorrendo na bacia em análise. No entanto, é fundamental ressaltar que a dinâmica dos sedimentos é também fortemente influenciada por fatores como a cobertura vegetal, o uso do solo e a topografia (PEIXOTO et al., 2020).

5.2 AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS SIMULADOS PELO MODELO SWAT

As simulações realizadas abrangeram o período compreendido entre 2011 e 2016, envolvendo simulações hidrossedimentológicas na bacia do Taboão. Para a execução dessas simulações, foram utilizados dados de precipitação em intervalos de tempo subdiários, empregando o método de Green & Ampt, além de intervalos de tempo diários, utilizando o método da Curva Número. Adicionalmente, foram empregadas diferentes equações para a evapotranspiração, distintos métodos de propagação de escoamento nos canais fluviais e ainda, diferentes métodos de transporte de sedimentos no canal.

A análise comparativa foi realizada entre os dados simulados e os dados observados, objetivando avaliar a capacidade do modelo SWAT em simular com precisão os processos hidrossedimentológicos da bacia, especialmente em relação à vazão e à produção de sedimentos. Os resultados obtidos foram segmentados em três componentes fundamentais, sendo eles: análise de sensibilidade, processo de calibração e processo de validação, tanto para vazão diária quanto para a produção de sedimentos diária na bacia.

5.2.1 Análise de sensibilidade do modelo SWAT para estimativa da vazão diária na bacia do Taboão

O modelo SWAT apresenta sensibilidade a múltiplas variáveis de entrada, incluindo fatores como vegetação, práticas de manejo, tipos de solo, condições climáticas, reservatório e canal (JHA, 2009; REUNGSANG et al., 2009; JEONG et al., 2010). Devido à complexidade decorrente do número significativo de parâmetros de entrada, a abordagem integral da incerteza associada a todos esses fatores se torna impraticável. Assim, torna-se crucial identificar os parâmetros que exercem a maior influência sobre o modelo, compreendendo sua relevância para os resultados obtidos. Tal análise permite priorizar a aquisição e o refinamento desses parâmetros específicos, conseqüentemente reduzindo a incerteza e fortalecendo a confiabilidade dos resultados obtidos (JHA, 2009).

Nessa pesquisa, a avaliação de sensibilidade foi conduzida considerando os parâmetros empregados na entrada do modelo, os quais estão detalhados na Tabela 11. Para tal, o *software* SWAT-CUP foi empregado com uma iteração inicial de 500 simulações, visando a avaliação de sensibilidade dos parâmetros. Foi realizada com base em 1.026 conjuntos de dados de vazão referentes ao período de 2013 (a partir de março) a 2016.

A Tabela 12 e 13 exibe os desfechos da análise de sensibilidade para os 27 parâmetros investigados na simulação de vazão na bacia do Taboão utilizando os métodos de infiltração, Curva Número e Green & Ampt. A classificação dos resultados obtidos foi estabelecida com base na estatística *p-Value* e os parâmetros examinados foram categorizados e organizados conforme a hierarquia proposta por Van Griensven et al. (2006). Aqui são apresentados os resultados mais significativos, ou seja, os parâmetros classificações como: "muito importante" (posição 1) e "importante" (posições 2 a 6).

Tabela 11 - Parâmetros utilizados para análise de sensibilidade, calibração e validação dos processos hidrossedimentológicos na bacia do Taboão.

Parâmetros utilizados para vazão	Parâmetros utilizados para sedimentos (BAG)	Parâmetros utilizados para sedimentos (YANG)
GW_DELAY	ADJ_PKR	ADJ_PKR
GWQMN	LAT_SED	LAT_SED
HRU_SLP	RSDIN	RSDIN
CH_N1	CH_COV1	CH_COV1
CH_N2	CH_COV2	CH_COV2
EPCO	CH_ERODMO	CH_ERODMO
ESCO	USLE_C	USLE_C
GW_REVAP	USLE_P	USLE_P
RCHRG_DP	USLE_K	USLE_K
REVAPMN	CH_BNK_KD	CH_BNK_KD
SURLAG	CH_BED_KD	CH_BED_KD
SLSOIL	CH_BED_D50	CH_BED_D50
LAT_TTIME	CH_BNK_D50	CH_BNK_D50
SOL_AWC1	CH_BNK_TC	CH_BNK_TC
OV_N	CH_BED_TC	CH_BED_TC
SHALLST	CH_BNK_BD	CH_BNK_BD
CH_K2	CH_BED_BD	CH_BED_BD
SLSUBBSN	PRF_BSN	PRF_BSN
SOL_K	SPEXP	CH_D50
SOL_Z	SPCON	C_FACTOR
SOL_ALBI	CH_D50	
BIOMIX	C_FACTOR	
BLAI		
CH_K1		
ALPHA_BF		
CN2		
CANMX		

Fonte: Autora (2023).

Tabela 12 - Análise de sensibilidade dos parâmetros para o processo de calibração da vazão utilizando o método de infiltração Curva Número, considerando a estatística *p-Value* e classificação de importância dos parâmetros proposta por Van Griensven et al. (2006)

Curva Número			
Cenário 1 e 5			
Parâmetros	p-Value	Ranking	Classificação
CN2	0,00000	1	muito importante
SOL_Z	0,00001	2	importante
ALPHA_BF	0,05042	3	importante
SOL_ALB	0,05199	4	importante
SURLAG	0,05203	5	importante
EPCO	0,05569	6	importante
Cenário 2 e 6			
Parâmetros	p-Value	Ranking	Classificação
CN2	0,00000	1	muito importante
SOL_Z	0,00901	2	importante
EPCO	0,05928	3	importante
SURLAG	0,06489	4	importante
ALPHA_BF	0,06691	5	importante
REVAPMN	0,08499	6	importante
Cenário 3 e 7			
Parâmetros	p-Value	Ranking	Classificação
CN2	0,00000	1	muito importante
SOL_Z	0,00003	2	importante
CH_N2	0,00891	3	importante
EPCO	0,03919	4	importante
ALPHA_BF	0,05489	5	importante
SURLAG	0,06042	6	importante
Cenário 4 e 8			
Parâmetros	p-Value	Ranking	Classificação
CN2	0,00000	1	muito importante
SOL_Z	0,00708	2	importante
EPCO	0,04602	3	importante
ALPHA_BF	0,07207	4	importante
SURLAG	0,07573	5	importante
REVAPMN	0,08666	6	importante

Fonte: Autora (2023).

Na análise de sensibilidade, os parâmetros mais sensíveis para a simulação da vazão demonstraram estar diretamente relacionados ao uso e ocupação do solo, CN2 (valor inicial da Curva Número do escoamento superficial para a condição de umidade II) e a pedologia SOL_Z (profundidade de cada horizonte).

Para o método CN, o parâmetro CN2 destacou-se como o de maior importância,

aparecendo consistentemente em todos os cenários considerados, evidenciando sua relevância nos diferentes contextos avaliados. O mesmo ocorreu para o parâmetro SOL_Z, que demonstrou uma importância significativa em todos os conjuntos de cenários. Tais parâmetros estão alinhados com o princípio do método CN, que tem base em informações de uso do solo. No estudo realizado por Schmitt (2021) na mesma bacia hidrográfica, esses dois parâmetros também ocuparam as duas primeiras posições na análise de sensibilidade realizada para avaliação da calibração da vazão na bacia do Taboão, utilizando o método CN.

Martins et al. (2020) também enfatizaram a sensibilidade desses parâmetros ao avaliarem a simulação da vazão diária, utilizando o método CN, na bacia do Ribeirão do Pinhal, caracterizada pelo cultivo de cana-de-açúcar.

Ademais, o parâmetro EPCO (fator de compensação de retirada de água do solo pelas plantas), revelou-se como um elemento frequente, sendo observado em todos os cenários, exceto no Cenário 1 e 5, indicando sua relevância quando o método CN é empregado nas simulações. Por outro lado, parâmetros como ALPHA_BF (constante de recessão do escoamento de base), SURLAG (coeficiente de atraso (lag) do escoamento superficial (h)) e REVAPMN (profundidade da água no aquífero raso para que ocorra percolação), embora presentes em vários cenários, exibiram uma frequência relativamente menor, alternando posições de importância, conforme equações empregadas para as simulações.

De modo geral, os parâmetros identificados como de maior importância nesta pesquisa também foram reconhecidos como sensíveis em estudos conduzidos em outras bacias hidrográficas. Alves (2018) realizou um estudo na bacia hidrográfica do Rio Catolé Grande (BHRCG), localizada na zona semiárida nordestina e no sudoeste da Bahia, utilizando o modelo SWAT em conjunto com o método de infiltração Curva Número, e identificou como sensível os parâmetros (CN2, EPCO, ALPHA_BF e REVAPMN). Aragão et al. (2013) também observaram relevância nos parâmetros (CN2, SOL_Z, ALPHA_BF e SURLAG) em simulações na sub-bacia do Rio Japarutuba Mirim, em Sergipe. Adicionalmente, ao utilizar o modelo SWAT no trecho superior da bacia do rio Descoberto, que pertence à bacia do Paraná e abrange áreas no Distrito Federal e Goiás, Sarmiento e Koide (2011) destacaram os parâmetros CN2, SURLAG e SOL_Z como muito importantes. Por outro lado, os parâmetros ALPHA_BF, EPCO e REVAPMN foram considerados de menor relevância, com base nos resultados das simulações realizadas.

Tabela 13 - Análise de sensibilidade dos parâmetros para o processo de calibração da vazão utilizando o método de infiltração Green & Ampt, considerando a estatística *p-Value* e classificação de importância dos parâmetros proposta por Van Griensven et al. (2006)

Green & Ampt			
Cenário 9 e 13			
Parâmetros	p-Value	Ranking	Classificação
LAT_TTIME	0,00000	1	muito importante
CH_K2	0,10414	2	importante
CH_K1	0,17555	3	importante
CN2	0,20539	4	importante
SOL_K	0,29577	5	importante
RCHRG_DP	0,31202	6	importante
Cenário 10 e 14			
Parâmetros	p-Value	Ranking	Classificação
LAT_TTIME	0,00000	1	muito importante
CH_K2	0,10342	2	importante
CH_K1	0,18337	3	importante
CN2	0,21887	4	importante
SOL_K	0,29691	5	importante
RCHRG_DP	0,31371	6	importante
Cenário 11 e 15			
Parâmetros	p-Value	Ranking	Classificação
CN2	0,00000	1	muito importante
CANMX	0,00000	2	importante
LAT_TTIME	0,00000	3	importante
SOL_Z	0,00193	4	importante
SOL_K	0,02854	5	importante
REVAPMN	0,04184	6	importante
Cenário 12 e 16			
Parâmetros	p-Value	Ranking	Classificação
CN2	0,00000	1	muito importante
CANMX	0,00000	2	importante
LAT_TTIME	0,00000	3	importante
SOL_Z	0,00029	4	importante
REVAPMN	0,04969	5	importante
CH_N2	0,09247	6	importante

Fonte: Autora (2023).

Para a análise de sensibilidade da vazão utilizando o método de Green & Ampt, os parâmetros que se mostraram mais sensíveis variaram conforme cenário avaliado, sendo identificadas situações em que se mostraram como mais sensíveis os parâmetros relacionados ao uso do solo (por exemplo: CN2, CANMAX, etc.) e outras, em que apresentaram maior sensibilidade àqueles parâmetros relacionados às características físicas da bacia e do canal

(como, por exemplo, LAT_TTIME, CH_K2, CH_K1, etc.).

O parâmetro LAT_TTIME (tempo do escoamento lateral) apareceu de forma constante em todos os cenários, indicando sua importância transversal na simulação com diferentes equações e métodos. Esta conclusão se alinha com conclusões do estudo realizado por Sari (2017), que destacou a sensibilidade significativa desse parâmetro durante a calibração da vazão diária na mesma bacia, empregando o método de infiltração Green & Ampt.

Da mesma forma, o parâmetro CN2 revela-se como um elemento essencial em todas as situações consideradas, sugerindo significância generalizada, ao aparecer sempre entre as cinco primeiras posições de sensibilidade. Além disso, o parâmetro SOL_K (condutividade hidráulica saturada na camada do solo), embora presente em uma quantidade ligeiramente menor de cenários, mantém uma presença considerável, demonstrando relevância em uma variedade de contextos. Por outro lado, parâmetros relacionados ao canal, como CH_K2, CH_K1 (condutividade hidráulica efetiva do canal principal e tributários, respectivamente), RCHRG_DP (regula a percolação da zona de raízes para o aquífero profundo), CANMX (quantidade máxima de água da chuva interceptada pela vegetação plenamente desenvolvida, disponível para evaporar sem atingir o solo (mm)), SOL_Z e REVAPMN, demonstraram maior ou menor importância, conforme cenário de equações e métodos avaliados.

No estudo conduzido por Schmitt (2021) na mesma bacia hidrográfica, utilizando o método de infiltração Green & Ampt, a autora identificou uma significativa influência na simulação da vazão proveniente de parâmetros associados aos processos de águas subterrâneas. Esta constatação contrasta com os resultados desta pesquisa, que destaca apenas o parâmetro RCHRG_DP (coeficiente de percolação da água para o aquífero profundo) como relevante em parte dos cenários analisados.

Ferrigo (2014), ao realizar uma revisão de 30 estudos com aplicação do modelo SWAT em bacias hidrográficas no Brasil, também relatou que o parâmetro CN2 aparece como o mais sensível para a simulação da vazão, comumente aparecendo nas primeiras posições de sensibilidade. O mesmo foi observado em revisões de pesquisas realizadas por Brighenti et al. (2017) e Bressiani (2016), as quais destacam o CN2 como o parâmetro mais sensível para estimativa da vazão com modelo SWAT. Neste trabalho, esse parâmetro apresentou grande sensibilidade, assumindo a primeira posição quando empregado o modelo de infiltração Curva Número e, além disso, mantendo importância significativa quando utilizado o modelo de infiltração Green & Ampt.

É importante notar que, ao empregar o método de infiltração Green & Ampt e o método

de propagação do escoamento *Variable Storage* (VE), os parâmetros mais sensíveis para a calibração da vazão foram os mesmos. Da mesma forma, ao adotar Green & Ampt em conjunto com o método de Muskingum, para infiltração e propagação no canal respectivamente, observou-se variação apenas nos quinto e sexto parâmetros no que se refere a sensibilidade do modelo SWAT para estimativa das vazões. Isso se deve, possivelmente, aos princípios de cada método.

5.2.2 Calibração e validação do modelo SWAT para estimativa da vazão diária na bacia do Taboão

Os resultados das análises de eficiência do modelo SWAT para a etapa de calibração (2013-março, 2014 e 2016) e validação (2015) da vazão diária na bacia do Taboão são apresentados na Tabela 14, abrangendo a utilização do método de infiltração de Green & Ampt para dados horários de precipitação e do método de infiltração da Curva Número para dados de precipitação diária. Adicionalmente, diferentes equações foram empregadas para simulação dos processos de evapotranspiração, propagação de escoamento nos canais e transporte de sedimentos.

Tabela 14 – Eficiência do modelo SWAT na calibração e na validação da vazão diária na bacia do Taboão, considerando diferentes equações de cálculo da evapotranspiração e diferentes métodos de infiltração e de propagação do escoamento no canal

Cenário	Modelo de infiltração	Equação de evapotranspiração	Método de propagação do escoamento no canal	Método de transporte de sedimentos no canal	Calibração - Vazão diária				Validação - Vazão diária			
					NS	R ²	PBIAS	RSR	NS	R ²	PBIAS	RSR
1	CN	Penman-Monteith	<i>Variable Storage</i>	Bagnold	0,33	0,58	33,50	0,82	0,44	0,66	32,70	0,75
2	CN	Hargreaves	<i>Variable Storage</i>	Bagnold	0,09	0,48	42,60	0,95	0,22	0,62	44,00	0,88
3	CN	Penman-Monteith	Muskingum	Bagnold	0,31	0,59	35,90	0,83	0,41	0,66	34,50	0,77
4	CN	Hargreaves	Muskingum	Bagnold	0,08	0,48	44,40	0,96	0,21	0,63	44,80	0,89
5	CN	Penman-Monteith	<i>Variable Storage</i>	Yang	0,33	0,58	33,60	0,82	0,44	0,66	32,70	0,75
6	CN	Hargreaves	<i>Variable Storage</i>	Yang	0,09	0,48	42,60	0,95	0,22	0,62	44,00	0,88
7	CN	Penman-Monteith	Muskingum	Yang	0,31	0,59	36,00	0,83	0,41	0,66	34,50	0,77
8	CN	Hargreaves	Muskingum	Yang	0,05	0,48	45,40	0,97	0,20	0,63	45,50	0,90
9	GA	Penman-Monteith	<i>Variable Storage</i>	Bagnold	0,66	0,67	2,10	0,58	0,76	0,76	2,50	0,49
10	GA	Hargreaves	<i>Variable Storage</i>	Bagnold	0,55	0,57	9,60	0,67	0,68	0,71	10,60	0,56
11	GA	Penman-Monteith	Muskingum	Bagnold	0,56	0,59	4,50	0,66	0,71	0,74	5,20	0,54
12	GA	Hargreaves	Muskingum	Bagnold	0,44	0,53	15,30	0,75	0,40	0,61	20,50	0,77
13	GA	Penman-Monteith	<i>Variable Storage</i>	Yang	0,66	0,67	2,10	0,58	0,76	0,76	2,50	0,49
14	GA	Hargreaves	<i>Variable Storage</i>	Yang	0,55	0,57	9,50	0,67	0,68	0,71	10,50	0,56
15	GA	Penman-Monteith	Muskingum	Yang	0,56	0,59	4,50	0,66	0,71	0,74	5,20	0,54
16	GA	Hargreaves	Muskingum	Yang	0,44	0,53	15,30	0,75	0,40	0,61	20,50	0,77

Onde: CN – Curva Número; GA – Green Ampt.

Em negrito: cenários com melhor desempenho na simulação da vazão diária

Fonte: Autora (2023).

O melhor desempenho do modelo SWAT para estimativa da vazão diária na etapa de calibração foi observado para o método de infiltração de Green & Ampt (cenário 9 e 13), que resultou em desempenho considerado "Satisfatório" para o critério NS, segundo a escala proposta por Moriasi et al. (2015); com valores de NS de 0,66, PBIAS de 2,1% e RSR de 0,58. Por outro lado, quando utilizado o modelo de infiltração da Curva Número, o desempenho do modelo na calibração da vazão diária foi considerado "Insatisfatório" para o critério NS, com melhor desempenho observado para os cenários 1 e 5, que alcançaram NS de 0,33, PBIAS de 33,5% e RSR de 0,82. Ao comparar os cenários de melhor desempenho, observa-se que o modelo apresentou melhor eficiência na estimativa da vazão diária quando empregada a equação de evapotranspiração de Penman-Monteith e o método de propagação de escoamento *Variable Storage* para calibração da vazão diária.

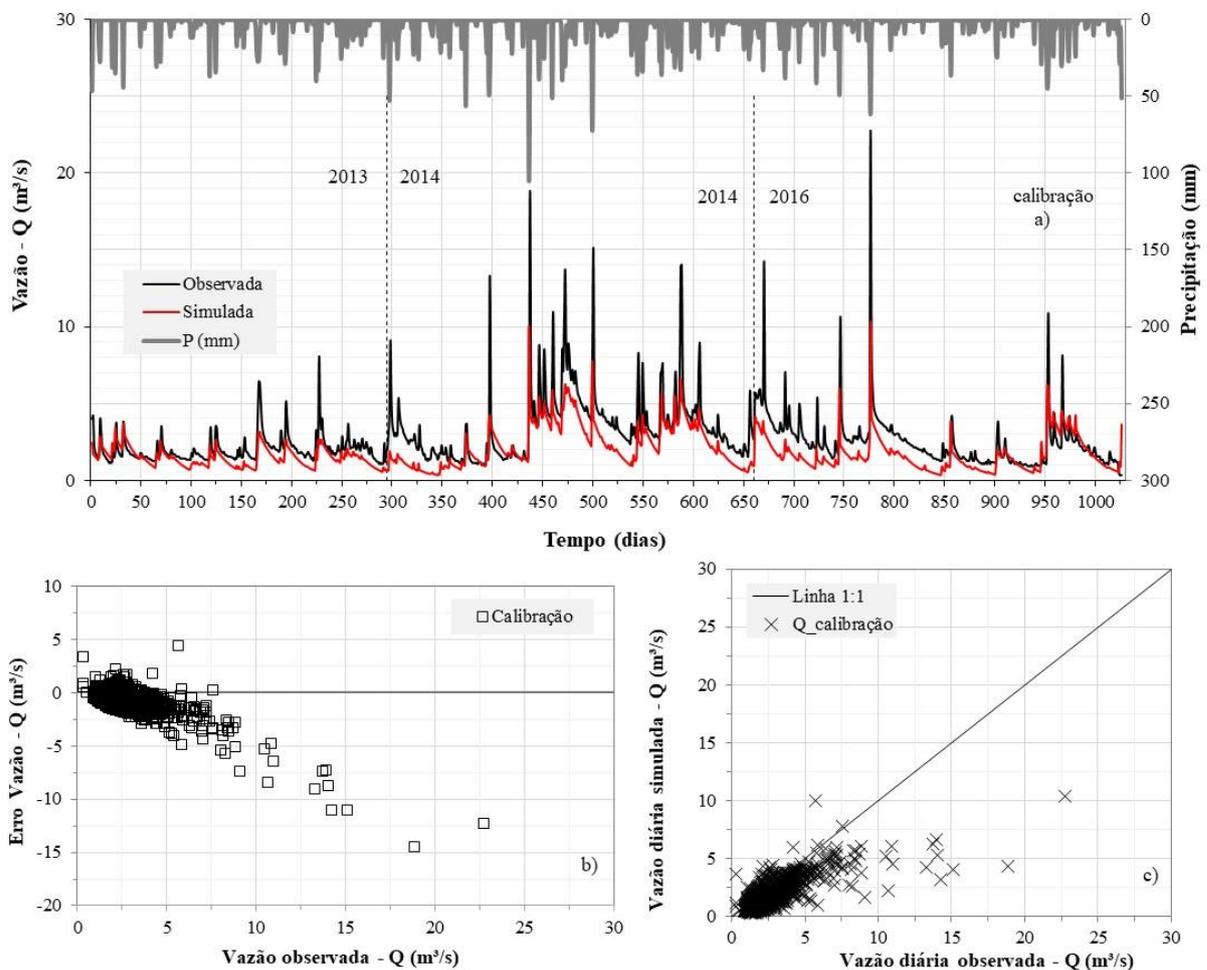
Na Figura 8 são apresentados, para a etapa de calibração do modelo SWAT: a) Variação da vazão diária observada e simulada na bacia do Taboão ao longo do tempo; b) Erro na estimativa da vazão diária em relação à vazão observada e; c) Ajuste entre vazão diária observada e simulada na bacia no Taboão; considerando uso do método de infiltração da Curva Número, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith e método de propagação de escoamento *Variable Storage* (cenários 1 e 5).

De forma geral, a tendência comportamental geral da vazão foi adequadamente simulada pelo modelo, entretanto, o modelo frequentemente subestima de vazão diária observada. A vazão média diária observada para o período foi de $2,75 \pm 1,95 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto a vazão média diária simulada foi de $1,83 \pm 1,22 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo a máxima vazão diária observada de $22,73 \text{ m}^3/\text{s}$ enquanto que a simulada foi de $10,37 \text{ m}^3/\text{s}$, ocorrida em abril de 2016. Observa-se ainda, que os ajustes tendem a piorar para valores de vazão diária mais elevados, sendo os erros verificados mais significativos para vazões a partir de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, ocorrendo subestimativas superiores a $14 \text{ m}^3/\text{s}$ para essas situações; o que indica que o modelo não prediz bem os eventos de vazão quando utilizado o método de infiltração da Curva Número.

No estudo conduzido por Schmitt (2021) na mesma bacia, o desempenho mais favorável durante a etapa de calibração da vazão diária no modelo SWAT, considerando o método CN, resultou em um NS de 0,51, PBIAS de 25,70%, e RSR de 0,70. Conseqüentemente, o modelo foi considerado "Satisfatório" para os parâmetros NS e RSR ($0,50 < \text{NS} \leq 0,70$ e $0,6 < \text{RSR} \leq 0,70$), mas "Insatisfatório" para o PBIAS ($\text{PBIAS} > \pm 15\%$), conforme a classificação estabelecida por Moriasi et al. (2015). Esse resultado foi obtido por meio da aplicação do mesmo método de infiltração, mesma equação de evapotranspiração e mesmo método de

propagação de escoamento utilizados para os cenários de melhor resultado deste estudo ao utilizar o método CN (cenários 1 e 5). No entanto, é importante ressaltar que a autora incorporou anos adicionais durante o processo de calibração, abrangendo o período total de 2013 a 2016, o que pode ter resultado em diferentes características climáticas dos dados utilizados para a etapa de calibração do modelo SWAT.

Figura 8 – Calibração da vazão diária no modelo SWAT: a) Variação da vazão diária observada e simulada na bacia do Taboão ao longo do tempo; b) Erro na estimativa da vazão diária em relação à vazão observada e; c) Ajuste entre vazão diária observada e simulada na bacia no Taboão; considerando uso do método de infiltração da Curva Número, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith e método de propagação de escoamento *Variable Storage* (cenários 1 e 5).



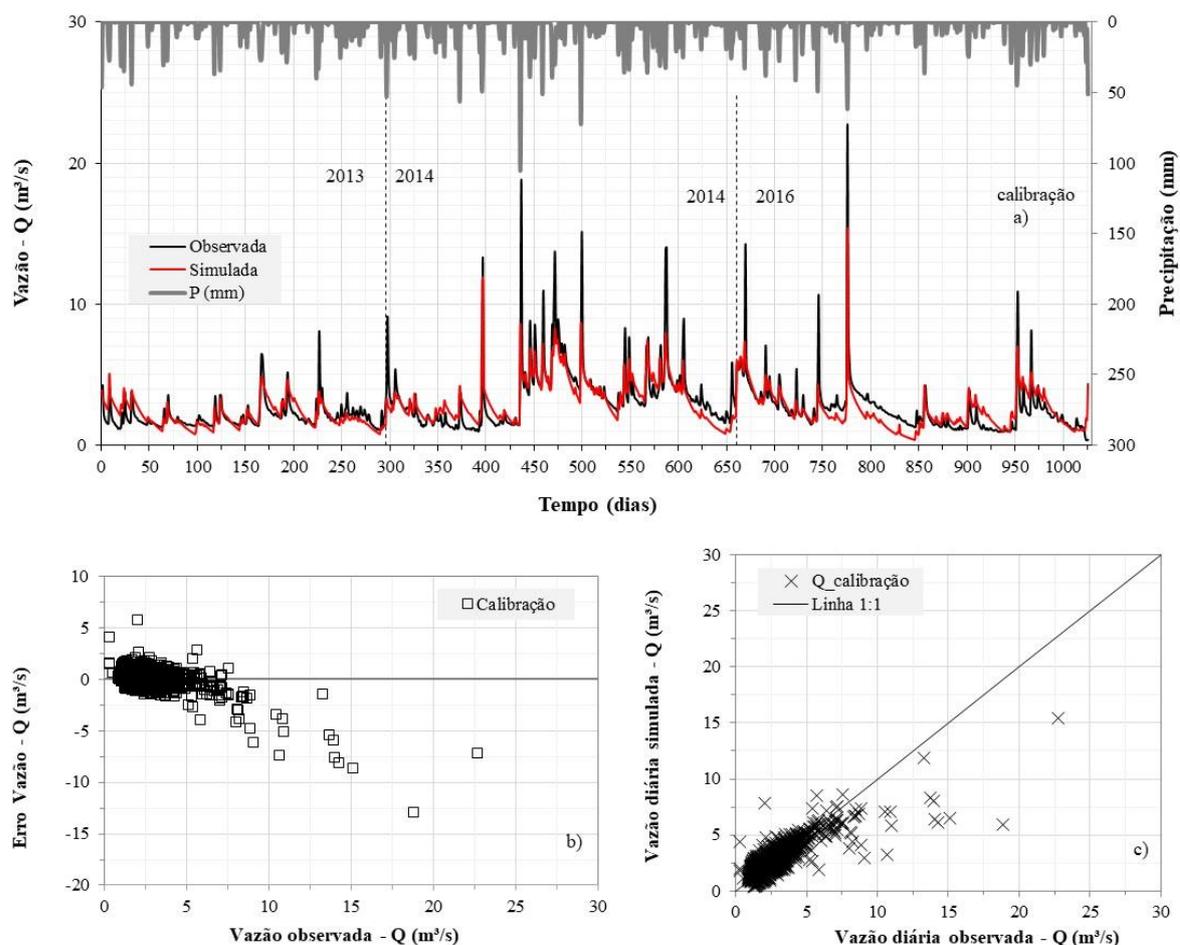
Fonte: Autora (2023).

Estudo realizado por Mariani et al. (2023) na mesma bacia hidrográfica e empregando semelhante período de análise e metodologias equivalentes de calibração, ou seja, com emprego do método CN, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith e método de propagação de escoamento *Variable Storage*, demonstrou resultado congruente ao observado na presente

pesquisa, alcançando um coeficiente de eficiência NS de 0,32, PBIAS de 33,9% e RSR de 0,82. Os autores utilizaram diferentes métodos de calibração associados a períodos secos, úmidos e intermediários dos dados de precipitação, para as etapas de calibração e de validação do modelo SWAT para previsão da vazão diária e da produção de sedimentos diária na bacia do Taboão.

Na Figura 9 são apresentados: a) Variação da vazão diária observada e simulada na bacia do Taboão ao longo do tempo, para o processo de calibração do modelo SWAT; b) Erro na estimativa da vazão diária em relação à vazão observada e; c) Ajuste entre vazão diária observada e simulada na bacia no Taboão; considerando uso do método de infiltração de Green & Ampt, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith e método de propagação de escoamento *Variable Storage* (cenários 9 e 13).

Figura 9 – Calibração da vazão diária no modelo SWAT: a) Variação da vazão diária observada e simulada na bacia do Taboão ao longo do tempo; b) Erro na estimativa da vazão diária em relação à vazão observada e; c) Ajuste entre vazão diária observada e simulada na bacia no Taboão; considerando uso do método de infiltração de Green & Ampt, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith e método de propagação de escoamento *Variable Storage* (cenários 9 e 13).



Fonte: Autora (2023).

Comumente, o modelo consegue representar adequadamente a variação da vazão diária simulada ao longo do tempo, em comparação à vazão diária observada, apresentando tendência à subestimativa dos picos de vazão simulada e superestimativa das baixas vazões. A vazão média diária simulada foi de $2,69 \pm 1,48 \text{ m}^3/\text{s}$ para uma vazão média diária observada de $2,75 \pm 1,95 \text{ m}^3/\text{s}$. A vazão máxima registrada no exutório da bacia atingiu $22,73 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto que o modelo SWAT estimou um valor de $15,46 \text{ m}^3/\text{s}$ para esse mesmo registro. O ajuste entre dados observados e simulados tende a piorar, com erros de maior magnitude, à medida que aumentam as vazões diárias observadas, sendo registrados erros de até $13 \text{ m}^3/\text{s}$ de subestimativa da vazão simulada em relação à observada.

Os resultados de desempenho verificados nesse estudo são similares aos reportados por Mariani et al. (2023) ao calibrar a vazão em escala diária no modelo SWAT, com entrada de dados horários de precipitação, uso do método de infiltração de Green & Ampt, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith e escolha do método de propagação de escoamento *Variable Storage*. Os autores encontraram NS de 0,69, PBIAS de 2,6% e RSR de 0,56, compatível com os achados dessa pesquisa para os cenários 9 e 13 (NS= 0,66; PBIAS=2,1% e RSR=0,58).

Já o estudo conduzido por Sari (2017) apresentou coeficiente de eficiência NS de 0,72 e PBIAS de 11,50%, ao calibrar a vazão diária tendo por base dados horários de precipitação, emprego do método de infiltração e Green & Ampt e propagação no canal pelo método *Variable Storage*. Por outro lado, resultados divergentes foram identificados por Schmitt (2021), que relatou NS de 0,58 para a calibração da vazão diária na bacia do Taboão. Deve-se enfatizar, que ambos os trabalhos utilizaram as mesmas equações do melhor cenário calibrado (cenário 9 e 13) empregado nessa pesquisa.

A consistência dos dados de precipitação empregados como entrada no modelo, as variações nos mapas utilizados, e as diferentes versões do *software* ArcGIS e SWAT adotadas, podem ter contribuído para as disparidades encontradas nos resultados. Além disso, há que se considerar que os parâmetros ajustados compõem, na verdade, uma faixa de variação possível e não um valor único, de forma que os resultados de vazão diária obtidos de uma simulação para outra não são únicos, mas variáveis dentro da faixa aceita como solução para os parâmetros calibrados, o que justificaria a pequena divergência desse trabalho com o ajuste realizado por Sari (2017).

Os resultados dos índices de desempenho obtidos nesse estudo, em geral, corroboram a

possibilidade de uso do modelo SWAT com entrada de dados horários de precipitação e método de infiltração de Green & Ampt para estimativa da vazão diária na bacia do Taboão. Por outro lado, as simulações sugerem resultados inadequados para uso futuro do modelo com dados diários de precipitação e emprego do método de infiltração da Curva Número.

Após o processo de calibração da vazão do modelo, foi iniciada a fase de validação. Durante essa etapa, os parâmetros ótimos derivados da calibração foram mantidos constantes, enquanto os conjuntos de dados de entrada de precipitação e os dados observados de vazão foram alterados. O propósito dessa abordagem foi avaliar a habilidade do modelo SWAT em simular séries temporais distintas das utilizadas na calibração. Com esse intuito, foram conduzidas validações utilizando o ano de 2015.

Primeiramente, foi realizada a validação dos cenários que empregavam o método de infiltração da Curva Número, sendo observado que os cenários 1 e 5 demonstraram os resultados mais promissores, semelhante ao que ocorreu na fase de calibração do modelo para estimativa da vazão diária (Tabela 14). Os indicadores de desempenho para esses cenários foram avaliados como “Insatisfatórios”, com um coeficiente de eficiência NS de 0,44, PBIAS de 32,7% e RSR de 0,75, de acordo com os critérios definidos por Moriasi et al. (2015).

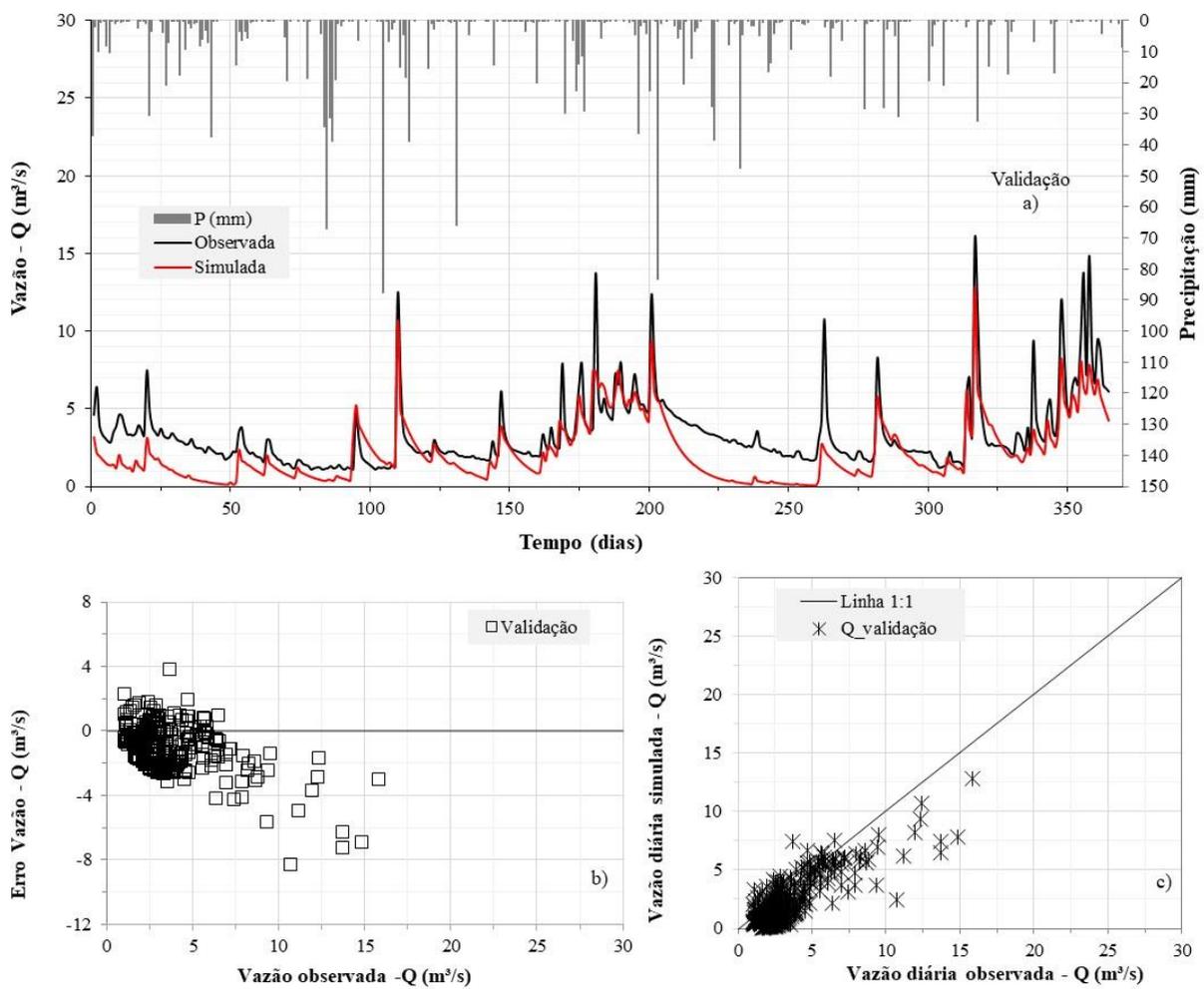
Na Figura 10 são apresentados, para a etapa de validação do modelo SWAT: a) Variação da vazão diária observada e simulada na bacia do Taboão ao longo do tempo; b) Erro na estimativa da vazão diária em relação à vazão observada e; c) Ajuste entre vazão diária observada e simulada na bacia no Taboão; considerando uso do método de infiltração da Curva Número, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith e método de propagação de escoamento *Variable Storage* (cenários 1 e 5).

Usualmente, o modelo SWAT consegue representar a variação geral do comportamento da vazão diária simulada ao longo do tempo, em comparação à tendência de variação da vazão diária observada. Contudo, ocorre subestimativa dos picos de vazões diárias simuladas pelo modelo em até 8,3 m³/s. A vazão média diária simulada foi de 2,23±2,00 m³/s, em contraponto a uma vazão média diária observada de 3,33±2,3 m³/s. A maior vazão registrada no exutório da bacia foi de 15,86 m³/s, enquanto que o valor simulado para o mesmo período foi de 12,84 m³/s. Em geral, o ajuste entre dados observados e simulados tende a apresentar maior divergência com o aumento da vazão diária observada, sendo os erros verificados mais elevados para vazões maiores. A qualidade de ajuste é melhor e a magnitude dos erros é menor em comparação com a série de calibração da vazão diária.

Schmitt (2021) também observou desempenho insatisfatório para o processo de

validação da vazão diária na bacia do Taboão, ao utilizar o método de infiltração da Curva Número, resultando em um NS de 0,05. Todavia, há que se destacar, que a autora empregou diferentes intervalos para concluir a etapa de validação do modelo (2011, 2017 e 2019), os quais apresentam divergências climáticas em relação ao período considerado nesta pesquisa. Isso fica evidenciado pela média anual de precipitação total para os anos de 2011, 2017 e 2019, que foi de 1379,20 mm, enquanto que para o ano de 2015, a média anual de precipitação total atingiu 1727,16 mm.

Figura 10 - Validação da vazão diária no modelo SWAT: a) Variação da vazão diária observada e simulada na bacia do Taboão ao longo do tempo; b) Erro na estimativa da vazão diária em relação à vazão observada e; c) Ajuste entre vazão diária observada e simulada na bacia no Taboão; considerando uso do método de infiltração da Curva Número, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith e método de propagação de escoamento *Variable Storage* (cenários 1 e 5).



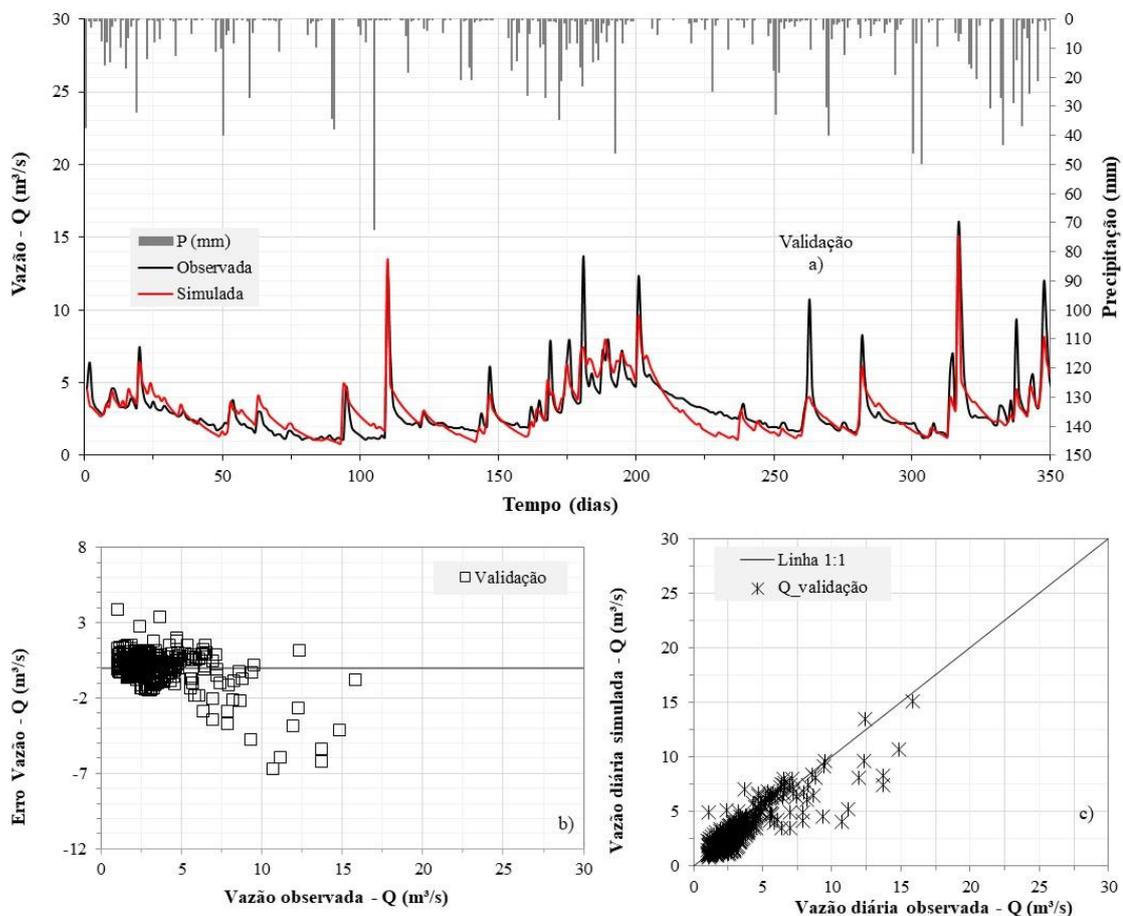
Fonte: Autora (2023).

Resultados mais favoráveis de desempenho foram notados quando se utilizou o método

de infiltração de Green & Ampt para validar a vazão diária na bacia do Taboão, com emprego dos cenários 9 e 13 (Tabela 14). Esses cenários alcançaram um coeficiente de eficiência NS de 0,76, PBIAS de 2,5% e RSR de 0,49, o que classifica o modelo como de "Bom" desempenho para a estatística NS e "Muito bom" para o PBIAS e RSR, conforme critérios estabelecidos por Moriasi et al. (2015).

Na Figura 11 são mostrados, para a etapa de validação do modelo SWAT: a) Variação da vazão diária observada e simulada na bacia do Taboão ao longo do tempo; b) Erro na estimativa da vazão diária em relação à vazão observada e; c) Ajuste entre vazão diária observada e simulada na bacia no Taboão; considerando uso do método de infiltração de Green & Ampt, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith e método de propagação de escoamento *Variable Storage* (cenários 9 e 13).

Figura 11 – Validação da vazão diária no modelo SWAT: a) Variação da vazão diária observada e simulada na bacia do Taboão ao longo do tempo; b) Erro na estimativa da vazão diária em relação à vazão observada e; c) Ajuste entre vazão diária observada e simulada na bacia no Taboão; considerando uso do método de infiltração de Green & Ampt, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith e método de propagação de escoamento *Variable Storage* (cenários 9 e 13).



Fonte: Autora (2023).

Assim como ocorrido na fase de calibração, o modelo demonstra uma boa representação do comportamento da variação das vazões diárias ao longo do tempo, embora mostre tendência a subestimar os picos de vazão simulados e a superestimar as baixas vazões. A vazão média diária simulada foi de $3,24 \pm 1,99 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto a vazão média diária observada foi igual a $3,33 \pm 2,3 \text{ m}^3/\text{s}$. O registro mais alto de vazão no exutório da bacia foi de $15,86 \text{ m}^3/\text{s}$ enquanto que, o modelo estimou uma vazão de $15,06 \text{ m}^3/\text{s}$. Para esse caso, o ajuste entre dados observados e simulados de vazão diária foi mais representativo, sendo que o número de subestimativas e superestimativas do modelo é próximo, e o maior erro registrado na subestimativa foi de cerca de $6,7 \text{ m}^3/\text{s}$; de forma que o modelo apresentou desempenho notadamente superior aos resultados observados para o uso do método de infiltração da Curva Número.

Sari (2017) obteve um coeficiente de eficiência NS de 0,52 na validação da vazão diária na bacia do Taboão, enquanto que Schmitt (2021) registrou NS de 0,11. A diferença nos resultados pode ser atribuída, em grande parte, ao período de dados utilizados para a validação, o que ocasiona diferenças nas características climáticas dos períodos simulados por cada autor. Sari (2017) conduziu sua análise com base nos valores diários de vazão referentes aos anos de 2011 e 2015, os quais exibiram uma média anual de precipitação de 1692,21 mm. Em contraste, Schmitt (2021) empregou dados correspondentes aos anos de 2011, 2017 e 2019, apresentando uma média anual de precipitação de 1379,20 mm. No contexto deste estudo, a média anual de precipitação superou as médias relatadas nos estudos mencionados, alcançando 1727,16 mm.

Mariani et al. (2023), por sua vez, ao realizar estudos na mesma bacia e empregar as mesmas equações e períodos de tempo empregados nessa pesquisa, alcançaram resultados semelhantes ao observado no presente trabalho, reportando coeficiente de eficiência NS de 0,77, PBIAS de 2,5% e RSR de 0,48. Os autores avaliaram períodos secos, úmidos e intermediários para calibração e validação do modelo SWAT para estimava da vazão diária e da produção diária de sedimentos no exutório da bacia.

Após uma análise dos resultados obtidos para a simulação da vazão diária na bacia do Taboão, é possível afirmar que os melhores resultados estão relacionados à aplicação do método de infiltração de Green & Ampt, associado ao uso da equação de evapotranspiração Penman-Monteith e do método de propagação do escoamento *Variable Storage*. Além disso, as estatísticas NS demonstraram que o modelo apresentou desempenho superior durante o período de validação da vazão em comparação à etapa calibração, quando considerados esses cenários nas simulações; o que indica que o modelo SWAT pode ser usado como um bom preditor da

vazão diária na bacia do Taboão, pois possui capacidade de generalização dos dados para uma série diferente daquela utilizada na calibração do modelo.

5.2.4 Análise de sensibilidade para produção diária de sedimentos na bacia do Taboão

Após a calibração do modelo SWAT para os processos hidrológicos, procedeu-se à calibração da produção de sedimentos, a qual foi realizada tendo por base os dados dos anos de 2013 e 2015, utilizando também os anos de 2011 e 2012 como período de aquecimento do modelo. A validação, por sua vez, foi conduzida utilizando os dados dos anos de 2014 e 2016.

A avaliação de sensibilidade para a produção de sedimentos considerou os parâmetros empregados na entrada do modelo, detalhados na Tabela 11. Foram considerados 22 parâmetros quando utilizada a Equação de Bagnold (BAGNOLD, 1977; WILLIAMS, 1980) para cálculo do transporte de sedimentos, degradação e aporte no canal, e 20 parâmetros quando utilizada a equação de Yang. Essa etapa de calibração foi realizada com base em 730 dados de produção diária de sedimentos, referentes ao período de 2013 e 2015.

A Tabela 15 fornece uma visão abrangente dos resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros examinados na simulação da produção de sedimentos. Os dados concentram-se nas médias dos parâmetros mais sensíveis para cada cenário, com base no método de infiltração, seja CN ou GA e no método de transporte de sedimentos no canal utilizado.

Tabela 15 - Análise de sensibilidade dos parâmetros para o processo de calibração da produção diária de sedimentos na bacia do Taboão

Método de infiltração	Método de transporte de sedimentos no canal	Principais parâmetros
Curva Número	Bagnold	PRF_BSN
		SPCON
		CH_COV1
		CH_COV2
Curva Número	Yang	CH_ERODMO
		LAT_SED
		CH_COV2
		USLE_P
Green & Ampt	Bagnold	SPCON
		CH_COV2
		CH_COV1
		PRF_BSN
Green & Ampt	Yang	USLE_K
		USLE_C
		C_FACTOR
		PRF_BNS

Fonte: Autora (2023).

Ao comparar os cenários avaliados, percebe-se que a sensibilidade dos parâmetros varia consideravelmente entre os cenários que adotaram diferentes métodos de transporte de sedimentos no canal.

Naqueles cenários em que o método selecionado para o transporte de sedimentos no canal foi a equação de Bagnold, identificou-se a presença de diversos parâmetros de influência nas simulações. O parâmetro PRF, responsável pelo ajuste da taxa de pico para o aporte de sedimentos no canal, indica a importância de direcionar esforços para controlar os processos de degradação e deposição em bacias com características agrícolas, como a bacia do Taboão. Além disso, mostrou influência significativa nos padrões de transporte de sedimentos o parâmetro SPCON, utilizado para calcular a quantidade máxima de sedimentos que pode reentrar durante o aporte no canal. Tanto os parâmetros CH_COV1 quanto o CH_COV2, ligados ao fator de erodibilidade e à cobertura vegetal do canal, respectivamente, apresentaram contribuição fundamental na estabilidade e na erosão das margens do canal, mostrando grande relevância na modelagem da dinâmica hidrossedimentológica na bacia do Taboão.

Nos cenários que adotaram a equação de Yang como método de transporte de sedimentos no canal, os resultados variaram consideravelmente quando diferentes métodos de infiltração foram utilizados. Nas simulações que empregaram o método de infiltração da Curva Número, os parâmetros mais sensíveis identificados foram: CH_ERODMO, LAT_SED, CH_COV2 e USLE_P. Por outro lado, nos cenários que adotaram o método de infiltração de Green & Ampt, destacaram-se os parâmetros USLE_K, USLE_C, C_FACTOR e PRF_BNS, parâmetros mais relacionados ao uso do solo e práticas de manejo presentes na bacia.

5.2.5 Calibração e validação do modelo SWAT para produção diária de sedimentos na bacia do Taboão

Na Tabela 16 são apresentados os resultados das análises de eficiência do modelo SWAT para a calibração da produção diária de sedimentos, realizada utilizando os anos de 2013 e 2015, considerando como aquecimento do modelo os anos de 2011 e 2012. Também são mostrados os resultados da etapa de validação do modelo, que empregou o ano de 2014 e 2016. Estão descritos os resultados das simulações para ambos os métodos de infiltração avaliados: método de Green & Ampt, associado ao uso de dados de precipitação horária, e método da Curva Número, com emprego de dados de precipitação diária, considerando-se propagação no canal pelos métodos de Muskingum ou *Variable Storage*, evapotranspiração calculada por Hargreaves ou Penman-Monteith e ainda, transporte de sedimentos no canal avaliado pela

equação de Bagnold ou Yang.

O melhor resultado, após realizadas cinco iterações de 500 simulações cada, foi alcançado quando foi utilizado o método de infiltração de Green & Ampt, associado ao método de transporte de sedimentos no canal Bagnold (Cenário 9). Este cenário apresentou um desempenho considerado "Bom" para a estatística NS (NS=0,73) e "Muito Bom" para o PBIAS (PBIAS=-3,5%), conforme critérios estabelecidos por Moriasi et al. (2015). Por outro lado, ao considerar o método de infiltração da Curva Número, o Cenário 1 também resultou em um desempenho considerado "Bom" (NS= 0,73) para a estatística NS e "Muito Bom" para o PBIAS (PBIAS=-4,00%), conforme critérios de classificação de desempenho definidos por Moriasi et al. (2015).

Tabela 16 – Eficiência do modelo SWAT na calibração e na validação da produção diária de sedimentos na bacia do Taboão, considerando diferentes equações de cálculo da evapotranspiração, diferentes métodos de infiltração, de propagação do escoamento no canal e de transporte de sedimentos no canal

Cenário	Modelo de infiltração	Equação de evapotranspiração	Método de propagação do escoamento	Método de transporte de sedimentos no canal	Calibração – Produção diária de sedimentos				Validação – Produção diária de sedimentos			
					NS	R ²	PBIAS	RSR	NS	R ²	PBIAS	RSR
1	CN	Penman-Monteith	<i>Variable Storage</i>	Bagnold	0,73	0,72	-4,00	0,53	0,46	0,50	-53,50	0,73
2	CN	Hargreaves	<i>Variable Storage</i>	Bagnold	0,60	0,61	-7,00	0,63	0,45	0,45	-14,70	0,74
3	CN	Penman-Monteith	Muskingum	Bagnold	0,72	0,73	-16,80	0,52	0,48	0,48	-7,70	0,72
4	CN	Hargreaves	Muskingum	Bagnold	0,71	0,71	-17,70	0,54	0,38	0,39	-17,10	0,79
5	CN	Penman-Monteith	<i>Variable Storage</i>	Yang	0,60	0,62	-29,20	0,63	0,36	0,40	23,30	0,80
6	CN	Hargreaves	<i>Variable Storage</i>	Yang	0,48	0,49	22,90	0,72	0,22	0,22	6,10	0,89
7	CN	Penman-Monteith	Muskingum	Yang	0,64	0,64	-7,50	0,60	0,38	0,41	1,60	0,79
8	CN	Hargreaves	Muskingum	Yang	0,53	0,53	22,20	0,69	0,27	0,29	-20,20	0,85
9	GA	Penman-Monteith	<i>Variable Storage</i>	Bagnold	0,73	0,73	-3,50	0,52	0,64	0,64	2,50	0,60
10	GA	Hargreaves	<i>Variable Storage</i>	Bagnold	0,64	0,68	24,60	0,60	0,58	0,60	3,40	0,64
11*	GA	Penman-Monteith	Muskingum	Bagnold	-	-	-	-	-	-	-	-
12*	GA	Hargreaves	Muskingum	Bagnold	-	-	-	-	-	-	-	-
13	GA	Penman-Monteith	<i>Variable Storage</i>	Yang	0,30	0,41	88,20	0,84	0,30	0,39	87,80	0,84
14	GA	Hargreaves	<i>Variable Storage</i>	Yang	0,23	0,36	89,60	0,88	0,32	0,40	84,40	0,82
15*	GA	Penman-Monteith	Muskingum	Yang	-	-	-	-	-	-	-	-
16*	GA	Hargreaves	Muskingum	Yang	-	-	-	-	-	-	-	-

Onde: CN – Curva Número; GA – Green Ampt.

* Não houve convergência da calibração da produção diária de sedimentos na bacia do Taboão quando utilizado o método de Muskingum para propagação do escoamento no canal

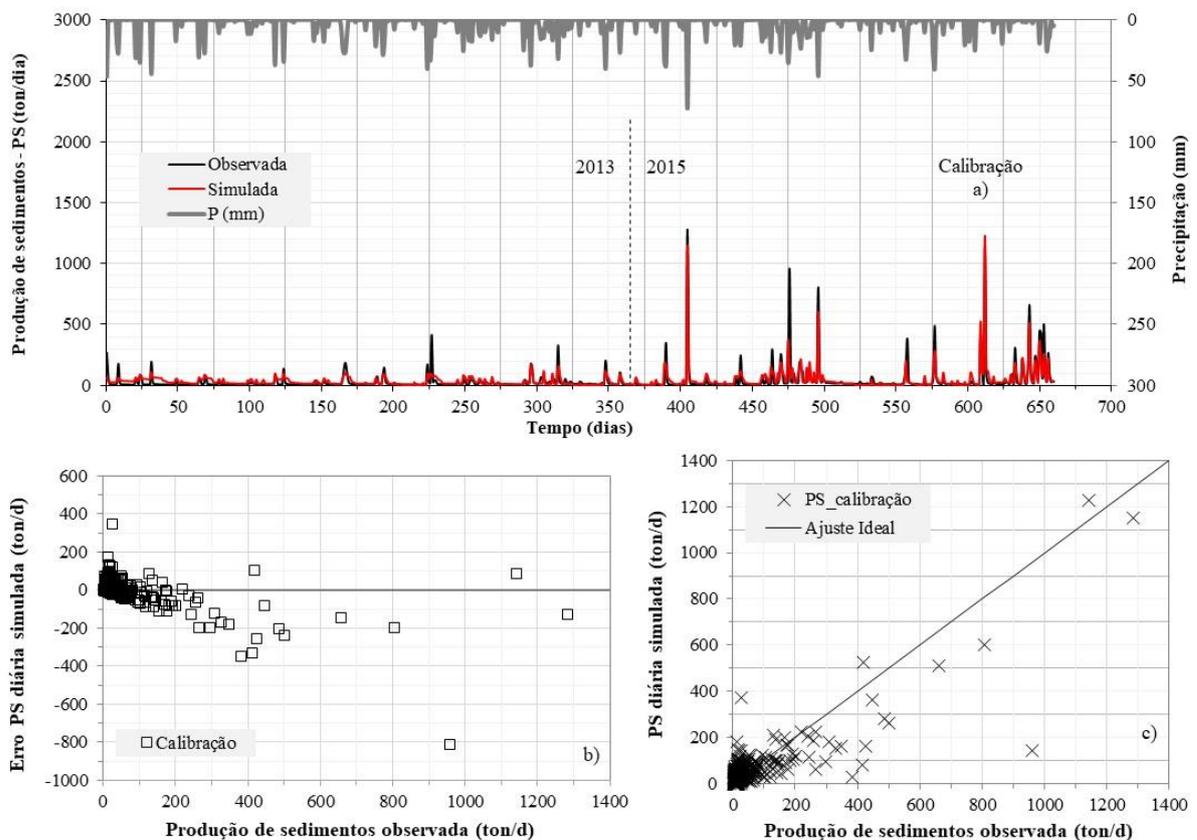
Em negrito: cenários com melhor desempenho na simulação da produção diária de sedimentos

Fonte: Autora (2023).

Ao comparar os cenários de melhor desempenho do modelo, percebe-se que ambos empregaram a equação de evapotranspiração de Penman-Monteith, o método de propagação de escoamento de *Variable Storage* e o método de Bagnold para avaliação do transporte de sedimentos no canal, sugerindo escolhas dessas equações e métodos como mais adequados para simulações futuras na bacia hidrográfica do Taboão.

Na Figura 12 são apresentados, para a calibração da produção diária de sedimentos, a variação da produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia do Taboão, ao longo do tempo; o erro na estimativa da produção diária de sedimentos simulada em relação à observada e ainda; o ajuste entre produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia no Taboão. Os resultados foram obtidos considerando uso do método de infiltração da Curva Número, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith, método de propagação de escoamento *Variable Storage* e transporte de sedimentos pela equação de Bagnold (cenário 1).

Figura 12 - Calibração da produção diária de sedimentos no modelo SWAT: a) Variação da produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia do Taboão, ao longo do tempo; b) Erro na estimativa da produção diária de sedimentos em relação à produção diária de sedimentos observada e; c) Ajuste entre produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia no Taboão; considerando uso do método de infiltração da Curva Número, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith, método de propagação de escoamento *Variable Storage* e transporte de sedimentos pela equação de Bagnold (cenário 1).



Fonte: Autora (2023).

A produção diária de sedimentos média observada no exutório da bacia do Taboão foi de $34,32 \pm 99,18$ ton/d, enquanto o modelo estimou uma média de $35,68 \pm 80,67$ ton/d. A maior produção diária de sedimentos observada foi de 1.283,22 ton/d, para a qual o modelo previu uma produção de 1.150,00 ton/d, indicando subestimativa do valor simulado. Em geral, o modelo SWAT conseguiu simular a variação do comportamento da produção diária de sedimentos observada, errando na previsão dos picos produzidos, sendo o ajuste menos adequado para maiores valores de produção diária de sedimentos, com erro máximo atingindo cerca de 900 ton/d. Comumente, ocorre subestimativa dos picos de produção de sedimentos simulados para grandes eventos, embora ocorra predominância de superestimativa do modelo para os menores valores de produção diária de sedimentos, os quais costumam ocorrer em vazões mais baixas. O ajuste entre dados observados e simulados tende a piorar com o aumento da produção diária de sedimentos, alcançando erros mais elevados para valores de produção de sedimentos superiores a 300 ton/d.

Apesar disso, o desempenho geral do modelo foi considerado "Bom", seguindo a escala proposta por Moriasi et al. (2015), com $NS=0,73$ e $RSR=0,53$ e "Muito Bom" para o critério de PBIAS, com valor de $PBIAS=-4,00\%$. Esses resultados indicam uma boa precisão do modelo na simulação da produção diária de sedimentos, apesar das discrepâncias registradas em relação aos picos de valores reais de produção de sedimento observados na bacia.

No estudo conduzido por Schmitt (2021) na mesma bacia, hidrográfica utilizando a equação de evapotranspiração de Penman-Monteith, o método de propagação de escoamento de *Variable Storage* e o método de transporte de sedimentos no canal Bagnold, foi obtido um valor de NS inferior ($NS=0,30$) para o processo de calibração da produção de sedimentos, embora a autora tenha utilizado os mesmos anos, 2013 e 2015 para o processo de calibração do modelo.

Já no processo de calibração da produção diária de sedimentos utilizando dados de precipitação em intervalos horários, associado ao método de infiltração de Green & Ampt, o melhor resultado observado alcançou NS de 0,73, PBIAS de -3,5%, e RSR de 0,52; o que classifica o desempenho do modelo como "Bom" pela estatística NS, conforme proposto por Moriasi et al. (2015). Nesse caso, assim como para o método de infiltração da Curva Número, o melhor desempenho foi observado quando se utilizou a equação de evapotranspiração de Penman-Monteith, o método de propagação de escoamento de *Variable Storage* e o método de transporte de sedimentos no canal de Bagnold.

Na Figura 13 são apresentados, para a calibração da produção diária de sedimentos, a

variação da produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia do Taboão, ao longo do tempo; o erro na estimativa da produção diária de sedimentos simulada em relação à observada e ainda; o ajuste entre produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia no Taboão. Os resultados foram obtidos considerando uso do método de infiltração de Green & Ampt, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith, método de propagação de escoamento *Variable Storage* e transporte de sedimentos pela equação de Bagnold (cenário 9).

A tendência de variação da produção de sedimentos simulada representou bem o comportamento da série observada ao longo do tempo, apresentando maior divergência de ajuste e erros mais elevados para produções de sedimento acima de 300 ton/d. De maneira geral, o modelo revelou propensão a superestimar a produção de sedimentos observada em eventos de menor magnitude, ao mesmo tempo que subestimou os picos de produção de sedimentos em eventos mais intensos. O pico mais alto registrado nos dados observados, por exemplo, foi de 1.283,22 ton/d, contrastando com a previsão do modelo de apenas 972,10 ton/d. O erro máximo verificado foi de cerca de 680 ton/d, inferior ao observado quando aplicado o método de infiltração da Curva Número.

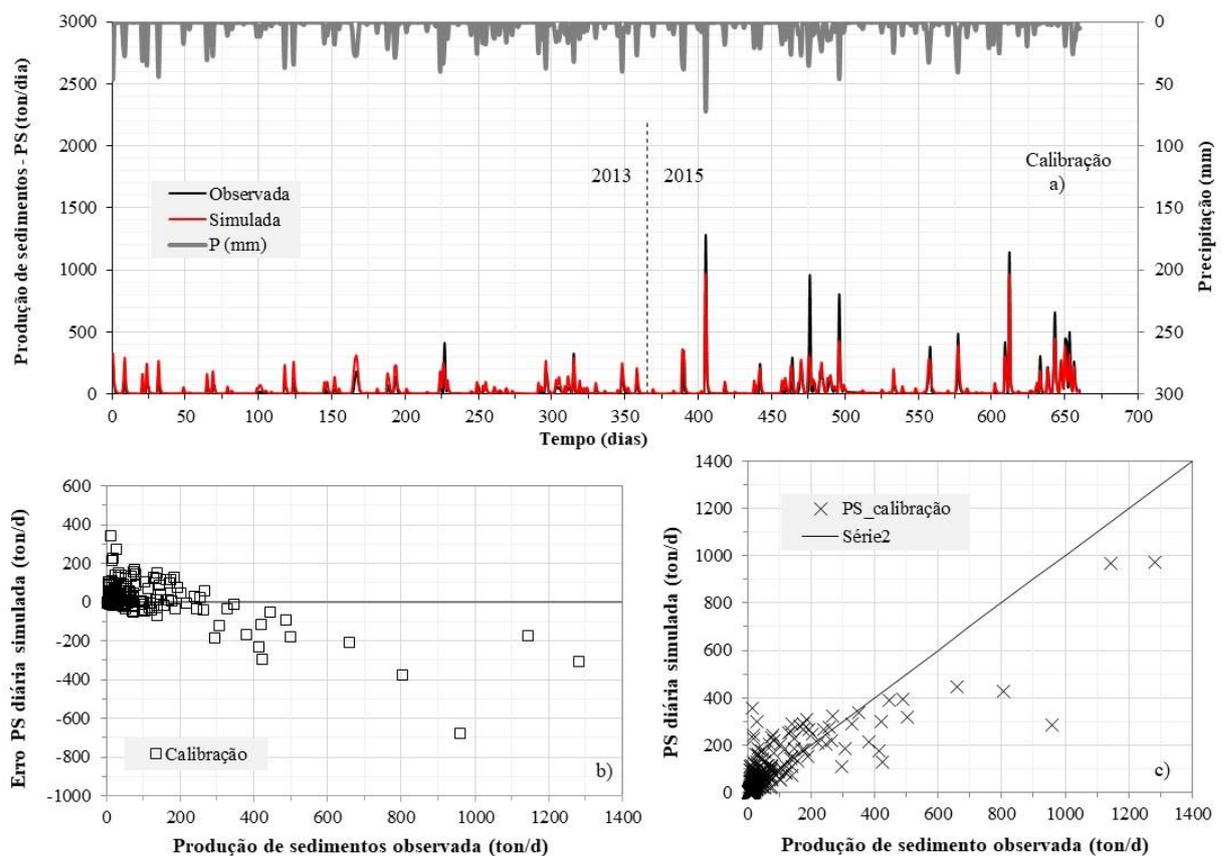
Mariani et al. (2023) obtiveram resultados categorizados como "Muito Bom" (NS=0,83), de acordo com classificação proposta por Moriasi et al. (2015), para a estimativa da produção de sedimentos diária na bacia do Taboão, evidenciando possibilidade de uso futuro do modelo SWAT para previsões, quando associado a dados de precipitação horária, ao método de infiltração de Green & Ampt, à equação de evapotranspiração de Penman-Monteith, ao método de propagação de escoamento de *Variable Storage* e ao método de Bagnold para análise do transporte de sedimentos no canal. Os autores utilizaram o mesmo período e dados para calibração da produção de sedimentos, entretanto, esses resultados de eficiência foram alcançados quando a vazão foi calibrada considerando apenas os meses chuvosos de 2013 a 2016. Essa escolha do intervalo de calibração da vazão pode ter contribuído para o resultado superior de desempenho do modelo em comparação com o obtido no presente estudo.

O estudo conduzido por Schmitt (2021), ao realizar a calibração da produção diária na bacia do Taboão, usando os mesmos métodos e equações, obteve NS inferior durante o processo de calibração da produção de sedimentos (NS=0,52). Importante destacar que a autora empregou o mesmo período de dados para análise dos sedimentos (2013 e 2015), mas período distinto para a calibração da vazão diária estimada pelo modelo (2013 a 2016).

Já Sari (2017) apresentou um valor de NS de 0,64 durante a calibração da produção diária de sedimentos, acompanhado de um PBIAS de -63,00% para os anos de 2013 e 2015.

Seguindo os critérios estabelecidos por Moriasi et al. (2007), essas estatísticas classificaram o desempenho do modelo como "Satisfatório" no que diz respeito ao critério NS durante a fase de calibração.

Figura 13 – Calibração da produção diária de sedimentos no modelo SWAT: a) Variação da produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia do Taboão, ao longo do tempo; b) Erro na estimativa da produção diária de sedimentos em relação à produção diária de sedimentos observada e; c) Ajuste entre produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia no Taboão; considerando uso do método de infiltração de Green & Ampt, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith, método de propagação de escoamento *Variable Storage* e transporte de sedimentos pela equação de Bagnold (cenário 9)



Fonte: Autora (2023).

Após a etapa de calibração do modelo SWAT para estimativa da produção diária de sedimentos, procedeu-se a fase de validação do modelo. Os resultados mais favoráveis na etapa de validação foram observados para os cenários que demonstraram melhor desempenho no processo de calibração. No método de infiltração Curva Número, o cenário 1 evidenciou o melhor desempenho, enquanto que, o método de infiltração Green-Ampt apresentou os resultados mais promissores para o cenário 9. Ambos os cenários empregaram o método de Bagnold para simulação do transporte de sedimentos no canal, equação de Penman-Monteith para determinação da evapotranspiração, e método de propagação de escoamento *Variable*

Storage.

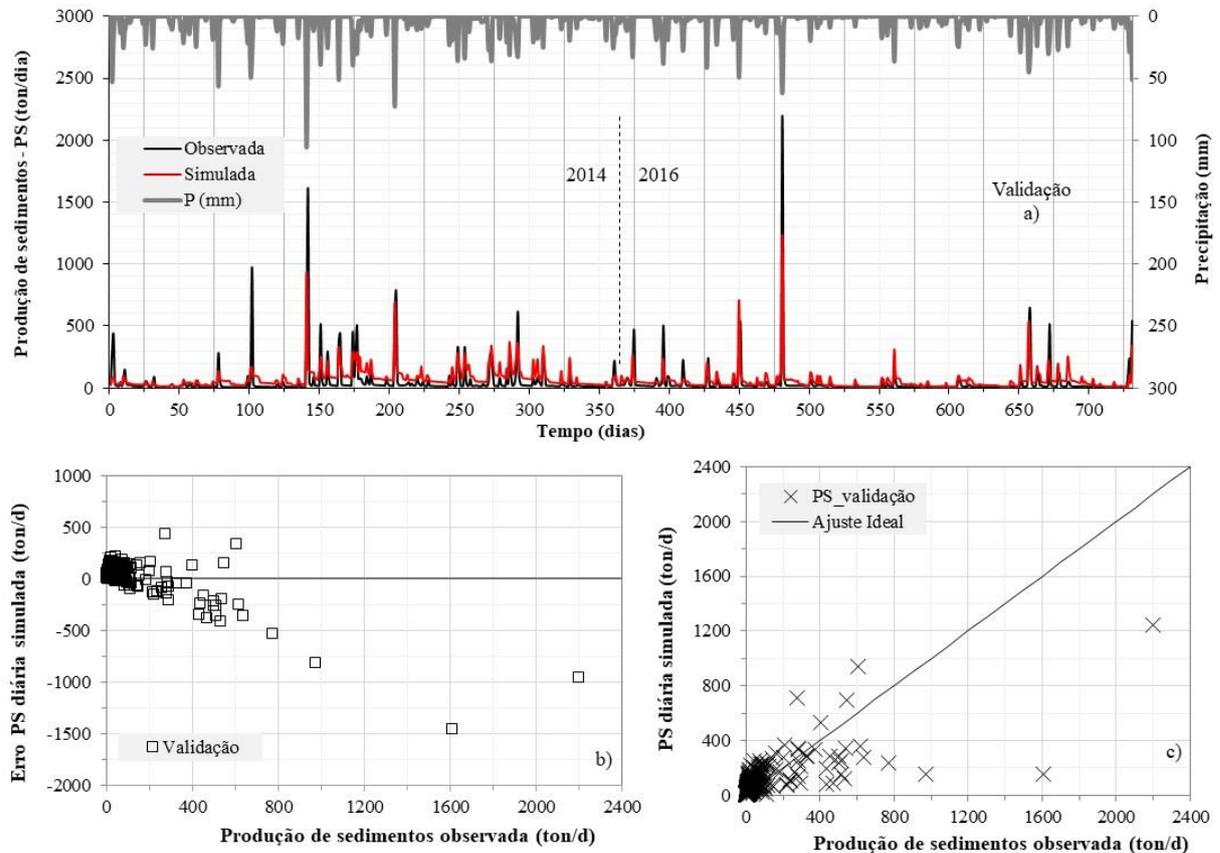
Na Figura 14 são apresentadas os resultados para a etapa de validação da produção diária de sedimentos no modelo SWAT, analisando-se a variação da produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia do Taboão, ao longo do tempo; o erro na estimativa da produção diária de sedimentos em relação à produção diária de sedimentos observada e; o ajuste entre produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia no Taboão; considerando uso do método de infiltração da Curva Número, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith, método de propagação de escoamento *Variable Storage* e transporte de sedimentos pela equação de Bagnold (cenário 1).

Durante o período de validação, a produção média diária simulada de sedimentos atingiu $66,50 \pm 88,13$ ton/d, em contraste com a produção média diária observada, que foi igual a $43,32 \pm 136,47$ ton/d. O valor mais elevado de produção de sedimentos registrado no exutório da bacia atingiu o valor de 2.202,22 ton/d enquanto que, o modelo previu somente 1.241,00 ton/d. De maneira semelhante ao ocorrido no processo de calibração, o modelo continuou a superestimar as produções de sedimentos em eventos de menor magnitude e subestimar os picos de produção de sedimentos em eventos mais intensos, sendo o erro máximo verificado na subestimativa de aproximadamente 1455 ton/d.

De acordo com classificação de desempenho estabelecida por Moriasi et al. (2015), a fase de validação para a produção diária de sedimento foi avaliada como "Satisfatória", alcançando NS de 0,46. Outros índices obtidos foram: R^2 igual a 0,5, PBIAS de -53,5 e RSR de 0,73. Usualmente, o modelo consegue representar a tendência geral de variação dos dados simulados em relação aos observados, sendo verificado decaimento da qualidade do ajuste e maiores erros para produções diárias de sedimento acima de 400 ton/d.

Na etapa de validação conduzida por Schmitt (2021), utilizando os anos de 2011, 2017 e 2019, o modelo SWAT foi avaliado como "Insatisfatório" em relação ao critério NS, apresentando estatísticas de eficiência $NS=0,07$, $PBIAS=-6,50\%$ e $RSR=0,97$. No entanto, é relevante notar que, apesar de não obter resultados favoráveis para os valores de NS e RSR, a série de dados foi razoavelmente bem representada pelo modelo quando se considera apenas o valor obtido para o PBIAS, o qual classificaria o desempenho do modelo como "Muito Bom", de acordo com os critérios propostos por Moriasi et al. (2015).

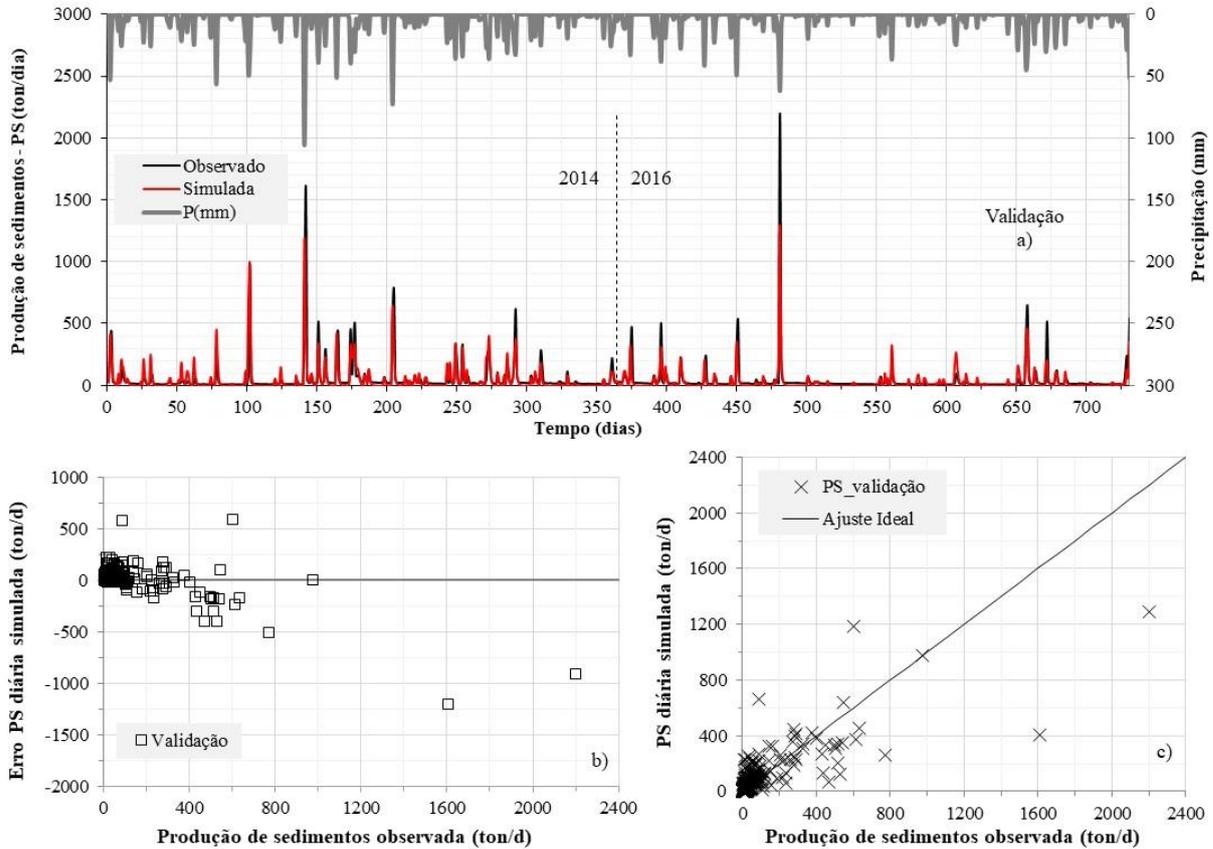
Figura 14 - Validação da produção diária de sedimentos no modelo SWAT: a) Variação da produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia do Taboão, ao longo do tempo; b) Erro na estimativa da produção diária de sedimentos em relação à produção diária de sedimentos observada e; c) Ajuste entre produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia no Taboão; considerando uso do método de infiltração da Curva Número, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith, método de propagação de escoamento *Variable Storage* e transporte de sedimentos pela equação de Bagnold (cenário 1)



Fonte: Autora (2023).

Durante a avaliação da eficiência do processo de validação do modelo SWAT com uso do método de infiltração de Green & Ampt (GA), o Cenário 9 demonstrou um desempenho superior em relação aos demais. Na Figura 15 são ilustrados os resultados desse cenário, com apresentação da variação da produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia do Taboão, ao longo do tempo; do erro na estimativa da produção diária de sedimentos em relação à produção diária de sedimentos observada e; do ajuste entre produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia no Taboão. Para as simulações foram considerados uso do método de infiltração de Green & Ampt, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith, método de propagação de escoamento *Variable Storage* e transporte de sedimentos pela equação de Bagnold.

Figura 15 - Validação da produção diária de sedimentos no modelo SWAT: a) Variação da produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia do Taboão, ao longo do tempo; b) Erro na estimativa da produção diária de sedimentos em relação à produção diária de sedimentos observada e; c) Ajuste entre produção diária de sedimentos observada e simulada na bacia no Taboão; considerando uso do método de infiltração de Green & Ampt, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith, método de propagação de escoamento *Variable Storage* e transporte de sedimentos pela equação de Bagnold (cenário 1).



Fonte: Autora (2023).

Esse foi avaliado como "Satisfatório" para o valor de NS e de acordo com os critérios definidos por Moriasi et al. (2015), atingindo NS de 0,64, PBIAS de 2,5 e um RSR de 0,6. Comumente, o modelo SWAT conseguiu representar adequadamente a variação da produção de sedimentos ao longo do dia, em comparação à série de dados monitorados na bacia. O ajuste mostrou-se adequado, com tendência a superestimativa dos valores de produção de sedimentos menos elevados e subestimativa da magnitude dos picos durante eventos de cheia. Os erros observados nas simulações forma menores do que aqueles verificados quando utilizado o método de infiltração da Curva Número. A produção de sedimentos média diária simulada foi de $43,32 \pm 136,47$ ton/d para um valor médio observado de $42,26 \pm 106,85$ ton/d, sendo o maior pico simulado pelo modelo de 1.292,00 ton/d para um valor observado de 2.202,22 ton/d.

Ainda assim, é importante ressaltar que os resultados obtidos nesse estudo para a etapa de validação foram superiores àqueles reportados por outros autores em estudos prévios

conduzidos na mesma bacia. De fato, Sari (2017) e Schmitt (2021) obtiveram resultados considerados "Insatisfatórios" para a validação da produção diária de sedimentos na bacia, com coeficientes de eficiência NS de 0,38 e -0,11, respectivamente. A discrepância entre os resultados das análises realizada na bacia, particularmente no que diz respeito à validação do modelo, pode estar relacionada aos diferentes anos utilizados para calibração e validação. Sari (2017) realizou a calibração do modelo para os anos de 2013 e 2015, enquanto a validação foi efetivada para o ano de 2014. Por outro lado, Schmitt (2021) também calibrou o modelo para os mesmos anos usados no estudo de Sari (2017), mas a validação foi realizada para os anos de 2014, 2017 e 2019.

Mariani et al. (2023), por sua vez, reportaram desempenho "Bom" do modelo na etapa de validação da produção diária de sedimentos na bacia do Taboão para os valores de NS e PBIAS, conforme critérios adotados por Moriasi et al. (2015). Os autores também utilizaram o período de dados de 2014 e 2016 para validação do modelo, obtendo NS de 0,77, PBIAS de 12,2% e RSR=0,48, sendo empregados os mesmos métodos e equações reportados no cenário 9 dessa pesquisa. É importante destacar, todavia, que o estudo de Mariani et al. (2023) utilizou os meses úmidos de 2013 a 2016 no processo de calibração do modelo para a estimativa da vazão diária e os meses úmidos de 2014 e 2016 para a validação da produção de sedimentos, a qual está diretamente relacionada a produção de sedimentos nas rotinas do SWAT.

5.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS PARA OS DIFERENTES CENÁRIOS AVALIADOS

Ao analisar os resultados obtidos nos diferentes cenários avaliados, percebe-se que a representação mais precisa da vazão diária e da produção diária de sedimentos na bacia do Taboão é alcançada ao empregar dados horários de precipitação, associada ao método de infiltração de Green & Ampt, com determinação da evapotranspiração pela equação de Penman-Monteith, uso do método *Variable Storage* para propagação do escoamento no canal e com emprego do método de Bagnold para análise do transporte de sedimentos no canal. A combinação desses quatro métodos resultou nos melhores desempenhos, evidenciando uma eficiência na representação dos processos e na reprodução dos picos de vazão e da produção de sedimentos na bacia.

A aplicação do método Green & Ampt, juntamente com dados de precipitação subdiários, pode oferecer uma representação mais precisa dos eventos simulados, e essa precisão pode estar associada a diversos fatores. A bacia do Taboão, caracterizada por sua área

relativamente pequena, apresenta tempos de resposta mais rápidos a eventos de precipitação em comparação com bacias de maior extensão. Por outro lado, a utilização do método da Curva Número em conjunto com dados diários de precipitação pode não refletir adequadamente os processos observados na escala subdiária. Este fenômeno é particularmente evidente em eventos de menor magnitude, nos quais a variabilidade das precipitações em diferentes pontos da bacia é mais pronunciada, resultando em uma maior variabilidade nos processos hidrológicos associados a esses eventos. Estudos conduzidos por King, Arnold e Bingner (1999), Viji, Prasanna e Ilangovan (2015) e Koltsida, Mamassis e Kallioras (2023) constataram que em bacias de pequeno e médio porte (de 1 a 75 km²), o uso de dados subdiários de chuva com o método de infiltração de Green & Ampt permite uma representação mais precisa da vazão após a ocorrência da chuva, em comparação ao uso de dados diários de precipitação associados ao método de infiltração da Curva Número.

Além disso, a predominância do uso do solo agrícola na bacia do Taboão, caracterizada pelo emprego de práticas como o plantio direto e a manutenção da palha no solo após a colheita, facilita a infiltração da água no solo e uma eficaz retenção da umidade, processos esses que podem ser melhor representados pelo método Green & Ampt. Em uma análise de dados de balanço hídrico entre maio de 1994 e dezembro de 1995, Castro et al. (1999) identificaram um baixo índice de escoamento superficial (7,7%) em uma sub-bacia de 20 km² situada dentro da bacia do Taboão, indicando a predominância do escoamento subsuperficial. Estudos conduzidos por Oliveira (2006) e Oliveira, Castro e Goldenfum (2010), por meio de lisímetros em uma sub-bacia da bacia do Taboão, colaboraram com essas observações ao demonstrar que a presença de palha no solo contribui para o aumento da drenagem profunda, resultando na redução do escoamento superficial e no incremento do escoamento subsuperficial e subterrâneo.

Há que se considerar também, que ocorre predomínio de solos do tipo Latossolos na bacia do Taboão, os quais são caracterizados pela elevada profundidade e permeabilidade. Essas propriedades sugerem a possibilidade de ocorrência de um maior escoamento subsuperficial e subterrâneo, processos que são mais eficazmente simulados pelo método de infiltração de Green & Ampt. Isso porque o método de Green & Ampt é muito influenciado por parâmetros relacionados ao solo, de modo que sua aplicação pode proporcionar uma representação mais exata da complexidade dos processos hidrológicos na bacia, dado que mais água é retida no perfil do solo em comparação ao método da Curva Número.

No estudo conduzido por Viji, Prasanna e Ilangovan (2015) em uma bacia hidrográfica

na Índia, a comparação entre os métodos do CN e GA revelou que, embora ambos os métodos tenham apresentado eficiência satisfatória na simulação hidrológica, o método GA se destacou pela maior eficácia na estimativa do escoamento subsuperficial, especialmente quando foram utilizados dados horários de precipitação. Essa constatação foi corroborada pelo estudo de Maharjan et al. (2013), em uma bacia de 0,8 hectares, localizada na Coreia do Sul. Foram realizadas simulações com 18 eventos de chuva, divididos entre os estágios de calibração e validação, que demonstraram que a utilização de dados horários de precipitação em conjunto com o método de infiltração Green-Ampt se mostrou eficiente na estimativa de escoamento em bacias hidrográficas.

Iensen e Santos (2017) simularam o escoamento de uma bacia de 0,1 km² em Santa Catarina, empregando dados sub-diários (precipitação no intervalo de 60 minutos) e diários. Os resultados indicaram uma eficiência NS de 0,70 e PBIAS de -2,79 para a calibração sub-diária, e NS de 0,72 e PBIAS de 0,80 para a calibração diária. Observou-se que o método Green & Ampt reproduziu de maneira mais precisa as vazões de pequena e média magnitude na simulação sub-diária. Ficklin e Zhang (2013) realizaram estudo na bacia hidrográfica agrícola do rio San Joaquin, na Califórnia, avaliando e comparando os dois modelos de infiltração, Curva Número e Green-Ampt. Os autores observaram que o método de infiltração de Green-Ampt previu com maior precisão eventos de grande vazão em comparação com o método da Curva Número.

Em uma revisão abrangente de 28 estudos que analisaram simulações hidrológicas com o uso de dados subdiários, Brighenti, Bonumá e Chaffe (2019) afirmam que não há evidências de que a área da bacia impacte negativamente no desempenho das simulações. Pelo contrário, foi relatado bom desempenho do modelo SWAT ao empregar o método de Green & Ampt, mesmo em bacias hidrográficas de maior extensão.

Em relação à determinação da evapotranspiração, Back (2008) destaca que o uso da equação de Penman-Monteith possui uma complexidade maior, sendo necessária uma extensa gama de dados meteorológicos, como temperatura do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade do ar, informações que são, muitas vezes, limitadas para diversos locais, em que a disponibilidade de dados é pouco significativa. De fato, em alguns postos meteorológicos, apenas a temperatura do ar e a precipitação são monitoradas, o que demanda a adaptação e avaliação de métodos empíricos para estimar a evapotranspiração de referência com base nos dados de temperatura do ar. Além disso, existem lugares em que, apesar da disponibilidade atual de informações para empregar o método de Penman-Monteith, a série histórica de

temperatura do ar é mais extensa do que as outras variáveis meteorológicas. Nestes casos, a determinação da evapotranspiração por meio de métodos baseados na temperatura do ar possibilita a realização de balanços hídricos em séries temporais mais longas.

Em pesquisa realizada em Urussanga - Santa Catarina, Back (2008), realizou uma comparação entre as estimativas da evapotranspiração de referência provenientes de nove métodos empíricos. Os resultados mostraram que o método Hargreaves-Samani subestimou a evapotranspiração em todos os meses do ano, em comparação ao método de Penman-Monteith. Essa mesma tendência foi observada em outros estudos, como os realizados por Neves, Silva e Crestana (2005), Fernandes (2006), Araújo Filho, Cabral e Azevedo (2007) e Borges e Mediondo (2007).

Ferreira (2021) avaliou a capacidade do modelo SWAT para simular a evapotranspiração em uma bacia característica do Bioma Cerrado, utilizando diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial disponíveis no modelo: Hargreaves, Priestley-Taylor e Penman-Monteith. Em termos gerais, observou-se uma similaridade entre os dados de Evapotranspiração Observada (ETobs) e Evapotranspiração Simulada (ETsim), em escalas anuais e mensais, ressaltando a capacidade potencial do programa SWAT na representação da evapotranspiração real, sendo o método de Penman-Monteith aquele que apresentou maior semelhança com os dados observados.

Ferraz et al. (2020) avaliou a evapotranspiração potencial na bacia do rio Catolé Grande por meio de diferentes métodos disponíveis nas rotinas do modelo SWAT: Penman-Monteith, Hargreaves-Samani e Priestley-Taylor. Os resultados dos coeficientes estatísticos demonstraram que a variação no método de estimativa da evapotranspiração potencial impactou o escoamento superficial simulado. A análise estatística, por meio do teste de Mann-Whitney, indicou que os modelos de Penman-Monteith e Hargreaves-Samani não apresentaram diferenças significativas na resposta da vazão, enquanto o método de Priestley-Taylor influenciou, consideravelmente, a estimativa dos processos hidrológicos, superestimando todos os valores de vazão. Portanto, os métodos de Hargreaves-Samani e Penman-Monteith mostraram-se apropriados para a modelagem hidrológica da bacia do rio Catolé Grande. Ainda segundo o autor, o método Penman-Monteith demonstrou níveis mais elevados de precisão em relação às vazões médias, em comparação com os demais métodos, apresentando um erro médio de 3,62%.

Na análise do transporte de sedimentos no canal, o modelo SWAT oferece quatro equações baseadas na energia do escoamento, sendo elas: Modelo Simplificado de Bagnold,

Modelo Kondatie (adequado para rios de grande largura com granulometria do material de fundo variando de silte a cascalho), Modelo Molinas and Wu (indicado para rios arenosos), e Modelo de Yang Areia e cascalho (desenhado para rios com granulometria variando de areia a cascalho). Estas equações visam prever a concentração máxima de carga do leito, calcular a erosão baseada na tensão de cisalhamento, dividir a erosão do canal em erosão de margem e do leito do rio, rastrear a distribuição do tamanho das partículas do sedimento a partir da erosão da superfície e calcular a erosão e deposição para seis tamanhos de partículas (CONDÉ, 2021).

Neste estudo, notou-se que o método de Bagnold apresentou desempenho superior ao método de Yang em todos os cenários simulados. Essa discrepância pode estar relacionada ao tipo predominante de solo na bacia, composto principalmente por Latossolos. Esses solos exibem um comportamento bastante similar ao dos solos argilosos, apesar de serem classificados como grãos de areia. A presença de argila em sua composição influencia significativamente o escoamento subsuperficial e subterrâneo, fatores que podem explicar a eficácia diferenciada do método na simulação. Nesse caso, o método de Bagnold consegue representar melhor o transporte de sedimentos de partículas de argila em relação ao método de Yang, que representa melhor o transporte de areias e pedregulhos.

Entretanto, é crucial salientar que a aplicação do método de Green & Ampt em simulações de vazão e produção de sedimentos com o modelo SWAT em bacias hidrográficas ainda é pouco comum e restrita, em especial devido à escassez de dados de precipitação em escala subdiária, (BRIGHENTI et al., 2019). Desse modo, investigações mais abrangentes e investimentos em monitoramentos contínuos e de longo prazo são imperativos para assegurar uma disponibilidade mais robusta de dados, possibilitando processos de calibração mais eficazes. Uma limitação adicional para a aplicação do método de Green & Ampt reside na necessidade de dados de entrada de precipitação contínuos e sem falhas, ao contrário do método da Curva Número, que pode lidar com lacunas nas séries de dados. Essa particularidade exige um preenchimento prévio dos dados de precipitação para garantir a continuidade necessária para as simulações.

Adicionalmente, há que se considerar também, que no contexto da modelagem de sedimentos, as dificuldades surgem já na etapa de coleta dos dados observados para a construção das séries utilizadas nas análises de produção de sedimento. Dado que a maior parte dos sedimentos em uma bacia hidrográfica é produzida durante eventos chuvosos, especialmente aqueles de alta magnitude, os pesquisadores enfrentam desafios relacionados à necessidade de contar com equipamentos automáticos ou estar fisicamente presentes no local

de coleta. Nesse cenário, a ocorrência de lacunas nos dados de monitoramento e, por conseguinte, a falta de representatividade na vazão e na produção de sedimentos para eventos de precipitação, podem estar associadas às dificuldades inerentes à presença dos pesquisadores no local para realizar a coleta durante tais eventos.

6 CONCLUSÃO

Este estudo abordou a modelagem dos processos de vazão diária e da produção diária de sedimentos na bacia do Taboão (RS, Brasil), utilizando o modelo SWAT. Diferentes abordagens foram exploradas, incluindo métodos de infiltração, equações de evapotranspiração, técnicas de propagação do escoamento em canais fluviais e métodos de transporte de sedimentos.

Ao avaliar a eficácia do modelo SWAT na simulação dos processos hidrológicos, observou-se que, em uma escala diária, o índice NS para calibração e validação foi de 0,33 e 0,44, com PBIAS de 33,5% e 32,7%, e RSR de 0,82 e 0,75, na calibração e validação, respectivamente, quando considerado modelo: método de infiltração da Curva Número, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith e método de propagação no canal *Variable Storage*. Este desempenho foi classificado como "Insatisfatório". Entretanto, em uma escala de dados subdiários de entrada de chuva, o modelo apresentou desempenho "Satisfatório" na calibração (NS=0,66) e "Bom" na verificação (NS=0,76), considerando simulação da vazão diária com: método de infiltração de Green & Ampt, evapotranspiração calculada por Penman-Monteith e método de propagação no canal *Variable Storage*.

No que diz respeito à produção diária de sedimentos com emprego do método de infiltração da Curva Número, o desempenho do modelo SWAT foi considerado "Bom" na calibração (NS=0,73; RSR=0,53; PBIAS= -4%) e "Satisfatório" na verificação (NS=0,46; RSR=0,73; PBIAS= -53,5%). Na escala subdiária, com uso do método de infiltração de Green & Ampt, o modelo recebeu uma classificação de "Bom" desempenho durante o processo de calibração, alcançando NS de 0,73, RSR de 0,52 e PBIAS de -3,5%. Na fase de validação, manteve um desempenho "Satisfatório", com NS de 0,64, RSR de 0,60 e PBIAS de 2,5%.

Analisando os resultados, destaca-se que a representação mais precisa da vazão e da produção diária de sedimentos na bacia do Taboão foi alcançada ao empregar dados horários de precipitação, o método de infiltração de Green & Ampt, a equação de evapotranspiração de Penman-Monteith, o método de propagação de escoamento de *Variable Storage* e o método de Bagnold para transporte de sedimentos no canal. A combinação desses métodos resultou nos melhores desempenhos, com boa eficiência na representação dos processos hidrossedimentológicos, bem como na reprodução dos picos observados.

As simulações indicaram que o modelo SWAT possui potencial de aplicação em bacias hidrográficas brasileiras. No entanto, para sua eficiente aplicação na estimativa dos processos hidrossedimentológicos na bacia do Taboão, faz-se necessário investigações mais aprofundadas

em termos das escalas temporal e espacial dos dados de entrada e de saída do modelo, bem como avaliação em escala subdiária e em diferentes pontos da bacia, de modo a assegurar uma compreensão mais abrangente e precisa dos processos hidrossedimentológicos e de sua distribuição na bacia.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K.C. **SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs- A User Manual**, 2015. 100p.

ABBASPOUR, K.C.; VEJDANI, M.; HAGHIGHAT, S. **SWAT-CUP Calibration and Uncertainty Programs for SWAT**; Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand: Christchurch, New Zealand, 2007; pp. 1596–1602.

AKSOY, H.; KAVVAS, M. L. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. **Catena**, v. 64, p. 247–271. 2005.

ALE, S. et al. Development and application of a distributed modeling approach to assess the watershed-scale impact of drainage water management. **Agricultural Water Management**, v. 107, 2012, p. 23-33.

ALVES, L. F. **Análise de sensibilidade de parâmetros do modelo hidrológico SWAT em função de diferentes características de bacias hidrográficas**. 2018, 85p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais – Área de concentração em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2018.

ARAGÃO, R. et al. (2013). Análise de Sensibilidade dos Parâmetros do Modelo SWAT e Simulação dos Processos Hidrossedimentológicos em uma Bacia no Agreste Nordestino. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, vol. 37, 2013.

ARAÚJO FILHO, P. F., CABRAL, J. J. S. P., AZEVEDO, J. R. G. Considerações sobre a variabilidade espacial da precipitação na bacia do riacho Gameleira em Pernambuco. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo-SP. **Anais**, 2007. CD Rom.

ARNOLD, J. G. et al. Large area hydrologic modeling and assessment Part I: model development. **Journal of the American water resources association**. v. 34, n. 1. p. 73 - 89. 1998.

ARNOLD, J. G. et al. Soil and Water Assessment Tool - Input/Output Documentation, Version 2012. **Texas Water Resources Institute**, TR-439, 2012a. 654p.

ARNOLD, J. G. et al. SWAT: model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491-1508, 2012b.

ARNOLD, J. G.; FOHRER, N. SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. **Hydrol Process**, v. 19, n. 3, p. 563–572, 2005.

ARROIO JUNIOR, P.P. **Avaliação da produção e transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Itaqueri, municípios de Itirapina e Brotas – SP**. 2013. 112f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

- BACK, A. J. Desempenho de métodos empíricos baseados na temperatura do ar para a estimativa da evapotranspiração de referência em Urussanga. **Irriga**, Botucatu-SP, v.13, n.4, p.449-466, 2008.
- BAGNOLD, R. A. Bedload transport in natural rivers. **Water Resources Research**, v. 13, n. 2, p. 303-312, 1977.
- BARROS, C. A. P. **Comportamento hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica rural com técnicas de monitoramento e modelagem**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.
- BEASLEY, D. B. et al. A model for watershed planning. **Transactions of the American Society Agricultural Engineers**, v. 23, n. 4, p. 938– 944, 1980.
- BECKERS, J.; SMERDON, B.; WILSON, M. **Review of Hydrologic Models for Forest Management and Climate Change Applications in British Columbia and Alberta**. Forum for Research and Extension in Natural Resources Society, Canadá, 166 p., 2009.
- BENNET, J. P. 1974. Concepts of mathematical modelling of sediment yield. **Water Resources Research**, Washington, v. 10, n. 3, p. 485-492.
- BEVEN, K. 1989. Changing ideas in hydrology - the case of physically based models. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 105, p. 157-172.
- BORGES, A. C.; MEDIONDO, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na bacia Rio Jacupiranga, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - PB, v. 11, n. 3, p.299-300, 2007.
- BORGES, A. L. de O.; BORDAS, M. P. Choix de bassins représentatifs et expérimentaux pour l'étude de l'érosion sur le plateau basaltique sudaméricain. **IAHS Publication**, v. 174, p. 161-169, 1988.
- BRAMORSKI, J. **Avaliação da perda de solo e fertilizantes nitrogenados por erosão em áreas agrícolas: uma abordagem integrada e experimental dos fatores intervenientes no processo**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/956811/1/TESEJulietabramorski14312.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2023.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul**. Recife: convênio MA/DPP – SA/ DRNR, Boletim Técnico 30, 1973. 431p.
- BRESSIANI, D. de A. **Coping with hydrological risks through flooding risk index, complex watershed modeling, different calibration techniques, and ensemble streamflow forecasting**. 2016. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-04042017-155701/>. Acesso em: 02 nov. 2023.

BRESSIANI, D. A. et al. A review of SWAT (Soil and Water Assessment Tool) applications in Brazil: challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering (IJABE)**, v. 8, n. 3, p. 9-35, 2015.

BRIGHENTI, T. M. et al. Análise de sensibilidade como primeiro passo para modelagem hidrológica: estudo de caso do modelo SWAT. In: XXII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS, 2017, Florianópolis/SC. **Anais...** Florianópolis: ABRHIDRO, 2017.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. Simulating subdaily hydrological process with SWAT: a review. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n. 12, p. 1415-1423, 2019.

CARVALHO, J. C. de et al. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J. et al (Org) **Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro**. 1ª ed. Brasília: Editora Finatec, p.39-91, 2006

CARVALHO, A. P. et al. **Levantamento semidetalhado dos solos da bacia do arroio Taboão (Pejuçara/Ijuí RS)**. Publicação interna, IPH/UFRGS, Porto Alegre, 1990. 41p. + Mapa 1:25.000.

CARVALHO, D. F. de; SILVA, L. D. B da. **Hidrologia**. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em:
<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/Cap%EDtulo%205/HIDRO%20Cap5%20%20INF.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2023.

CARVALHO, F. H. de. **Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro**. 2014. 154f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2014.

CARVALHO, N. de O. **Hidrossedimentologia prática**. 2ª ed., rev., atual e amp. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 599 p.

CASTRO, N. M. dos R.; CHEVALLIER, P.; SILVEIRA, A. L. L. da. Agriculture on the Brazilian basaltic plateau. Cultivations practices and soil conservation: first results of the Potiribu project. In: WICHEREK, S. (editor). *Farmland Erosion: in temperate plains environment and hills*, p. 403-414, 1993.

CASTRO, N. M. dos R. et al (1999). Land use change effects on runoff and erosion from plot to catchment scale on the basaltic plateau of Southern Brazil. **Hydrological Processes**, v. 13, p. 1621-1628, 1999.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Drenagem Urbana: Manual de Projeto**. 2ª ed. São Paulo: CETESB, 1980. 468 p.

CHEVALLIER, P.; CASTRO, N. M. dos R. As precipitações na região de Cruz Alta e Ijuí (RS-Brasil). **Recursos Hídricos Publicação**, v. 24, 1991. 25p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia Fluvial**. São Paulo, Edgard Blucher Ltda. 1981, 188p.

CONDÉ, R. C. C. **Análise da integração das ferramentas de hidrologia espacial “cor das águas” para o monitoramento e a modelagem swat dos processos hidrosedimentológicos na bacia do Rio São Francisco - Brasil.** 2021. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2021.

CUNGE, J. A. 1969. On the subject of a flood propagation method (Muskingum method). **J. Hydraulics Research** 7(2):205-230.

CUNICO, C. **Zoneamento ambiental da bacia hidrográfica do rio Marumbi-PR: perspectivas para a análise e avaliação das condições socioambientais.** 2007. 193 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

CUNICO, C.; OKA-FIORI, C. Zoneamento ambiental da bacia hidrográfica do rio Marumbi-PR: perspectivas para a análise e avaliação das condições sócio-ambientais. **Estudos Geográficos**, v. 6, n. 1, p. 37-61, 2008.

DE ROO, A. P. J.; OFFERMANS, R. J. E.; CREMERS, N. T. L. A single-event physically-based hydrological and soil erosion model for drainage basins. II: sensitivity analysis, validation and application. **Hydrological processes**, v.10, n.8, 1996.

DENARDIN, J. E. et al. **Manejo de enxurrada em sistema plantio direto.** Porto Alegre, Fórum Estadual de Solo e Água, 2005. 88p.

DEPINÉ, H. **Influência do preenchimento de falhas de dados horários de precipitação por redes neurais artificiais (RNAs) na simulação hidrológica de base física em uma bacia rural.** 2014. 123f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

DINIZ, L. da S. Caracterização Morfológica de uma Bacia Hidrográfica: aplicação às bacias hidrográficas dos Arroios Taboão e Turcato. Porto Alegre: UFRGS-IPH, 2001. 41p. (Inédito).

DURÃES, M. F. **Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do rio Paraopeba, por meio de simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo hidrológico distribuído.** 2010. 147 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2a edição, 1a impressão, 2006. 306p.

FARIA, S. G. et al. Análise dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas: uma revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 4, p. 1228-1244, 2021.

FENDRICH, R.; OBLADEN, N. L.; AISSE, M. M. **Drenagem e controle da erosão urbana.** 4ª ed. Curitiba: Champagnat, 1997. 486 p.

FERNANDES, L. C. **Avaliação de diversas equações empíricas de evapotranspiração. Estudo de caso: Campos dos Goytacazes e Ilha do Fundão-RJ.** 2006. 142f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

FERRAZ, L. L. et al. Influence of different methods of potential evapotranspiration estimation in the catolé grande river flow using the swat model. **Braz. J. of Develop.**, v. 6, p. 13893-13906, 2020.

FERREIRA, A. d. N. (2021). **Avaliação da evapotranspiração simulada com o programa SWAT no bioma Cerrado.** Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM – 238/2021, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 132p.

FERREIRA, P. H. de M. **Princípios de manejo e conservação do solo.** 2ª ed. São Paulo: Nobel, 1981.

FERRIGO, S. **Análise de consistência dos parâmetros do modelo swat obtidos por calibração automática – estudo de caso da bacia do lago descoberto - DF.** 2014. 147 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

FICKLIN, D. L.; ZHANG, M: A Comparison of the Curve Number and Green-Ampt Models in an Agricultural Watershed, *T. ASABE*, 56, 61–69, <https://doi.org/10.13031/2013.42590>, 2013.

FIRMINO, R. G.; FONSECA, M. B. Uma discussão sobre os impactos ambientais causados pela expansão da agricultura: A produção de biocombustíveis no Brasil. In: 7º CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 2008, Fortaleza. **Anais... AGRENER GD**, 2008.

FUJIHARA, A. K. **Predição de erosão e capacidade de uso do solo numa microbacia do oeste paulista com suporte de geoprocessamento.** 2002. 136 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

GARCIA, P. H. M. Discussão Teórica dos Métodos e Técnicas para Estudos em Bacias Hidrográficas, In: **Ciência Geográfica: Ensino, Pesquisa e Método** - Seção Bauru / Associação dos Geógrafos Brasileiro Vol. XX – Nº 1, Bauru / São Paulo – SP Editora Saraiva. 2016. p. 44 a 57.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 4, p. 1211-1250. 2007.

GIRARDI, R.V. et al. Avaliação do efeito de escala em características de chuva e vazão em sub-bacias embutidas da bacia do Potiribu – RS. **Revista Brasileira de Recursos hídricos**, v. 16, n. 2, p. 49-63, 2011.

GREEN, C. H.; VAN GRIENSVEN, A. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT 2005 in small-scale watersheds. **Environmental Modelling and Software**, v. 23, n. 4, p. 422-434, 2008.

GROSSI, C. H. **Diagnóstico e monitoramento ambiental da microbacia hidrográfica do Rio Queima-Pé, MT**. 2006. 135 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

GUERRA, A. J. T.; BOTELHO, R. G. M. Características e Propriedades dos Solos Relevantes Para os Estudos Pedológicos e Análise Dos Processos Erosivos. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 19 – 1996.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (orgs.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 2001.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA et al. **Erosão conservação do solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p.17-55.

GUERRA, A. J. T. Processos Erosivos nas Encostas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (org.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. 472 p.

GUIMARÃES, R. F. et al. Movimentos de massa. In: FLORENZANO, T.G. (org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 318p.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. **Journal of Hydrologic Engineering**, 1999, p. 135-143.

HARGREAVES, G. H. 1975. Moisture availability and crop production. Trans. ASAE 18: 980-984.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. 1982. Estimating potential evapotranspiration. Tech. Note, **J. Irrig. and Drain. Engr.** 108(3):225-230.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture** 1:96-99.

HARGREAVES, G. L.; HARGREAVES; G. H.; RILEY, J. P. 1985. Agricultural benefits for Senegal River Basin. **J. Irrig. and Drain. Engr.** 111(2):113-124.

HARTWIG, M. P. **Hidrologia**. Equipe de Produção de Material Didático da Universidade Aberta do Brasil do Instituto Federal Sul-rio-grandense, 2012.

HEATHMAN, G.C.; LAROSE, M.; ASCOUGH II, J.C. 2009. SWAT evaluation of soil and land use GIS data sets on simulated stream flow. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 64, n. 1, p. 17-32.

- IENSEN, I. R. R.; SANTOS, I. Simulação sub-diária e diária de escoamento com o modelo SWAT em pequena bacia experimental. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2017.
- IPAGRO. **Atlas agroclimático do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: IPAGRO, v. 3, mapa n. 232, 1989.
- JANSSEN, P. H. M.; HEUBERGER, P. S. C. **The role of sensitivity analysis and identifiability analysis in model calibration**. In: RIVM report nr. 723001007, RIVM, Bilthoven, the Netherlands (1992).
- JENSEN, M.E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70, ASCE, N.Y. 332 pp.
- JEONG, J. et al. Development and Integration of Sub-hourly Rainfall–Runoff Modeling Capability Within a Watershed Model. **Water Resources Management**, v. 24, p. 4505-4527, 2010. DOI 10.1007/s11269-010-9670-4.
- JEONG J, K. N. et al. Development of sub-daily erosion and sediment transport algorithms for SWAT. **Transactions of the ASABE**, v. 54, n. 5, p. 1685-1691, 2011.
- JHA, M. Hydrologic Simulations of the Maquoketa River Watershed Using SWAT. **Center for Agricultural and Rural Development (CARD)**. Ames, Iowa State University, 2009.
- KANNAN, N. et al. Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modeling in SWAT-2000. **Journal of Hydrology**, v. 332, n. 3-4, p. 456-466, 2007.
- KHOI, D.N.; THOM, V.T. Parameter uncertainty analysis for simulating streamflow in a river catchment of Vietnam. **Global Ecology and Conservation**, v. 4, p. 538–548, jun. 2015.
- KING, K. W.; ARNOLD, J. G.; BINGNER, R. L. Comparison of Green-Ampt and Curve Number methods on Goodwin creek watershed using SWAT. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 42 n. 4, p. 919-925, 1999.
- KIRNBAUER, R. et al. Identifying Space-time Patterns of Runoff Generation: A Case Study from the Löhnersbach Catchment, Austrian Alps. **Global Change and Mountain Regions**, v. 23, p. 309-320, 2005. doi:10.1007/1-4020-3508-x_31.
- KOLTSIDA, E.; MAMASSIS, N.; KALLIORAS, A. (2023). Hydrological modeling using the SWAT Model in urban and peri-urban environments: The case of Kifissos experimental sub-basin (Athens, Greece). **Hydrol. Earth Syst.** <https://doi.org/10.5194/hess-2021-482>.
- LAFAYETTE, K. P. V.; CANTALICE, J. R. B.; COUTINHO, R. Q. RESISTÊNCIA À EROSÃO EM RAVINAS, EM LATOSSOLO ARGILOARENOSO. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35:2167-2174, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/TxD9ymzHXxpzVxYQndqVBHC/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 15 jan. 2023.

- LOPES, V. L. **A numerical model of watershed erosion and sediment yield**. Tucson, PhD Dissertation, University of Arizona, EUA. 1987.
- LOPES, V. L.; SRINIVASAN, V. S. 1981. Erosão Superficial e produção de sedimentos pelas chuvas: o estado de conhecimento e perspectivas. In. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS 4. Fortaleza, 1981. **Anais...** São Paulo, Associação Brasileira de Hidrologia e Recursos Hídricos. V. 1, p. 228-44.
- MAHARJAN, G. R. et al. Evaluation of SWAT sub-daily runoff estimation at small agricultural watershed in Korea. **Frontiers of Environmental Science & Engineering**, v. 7, p. 109-119, 2013.
- MARIANI, P. P. et al. Different Infiltration Methods for Swat Model Seasonal Calibration of Flow and Sediment Production. *Water Resour Manage* (2023). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03671-1>.
- MARTINS, L. L. et al. Calibração hidrológica do modelo SWAT em bacia hidrográfica caracterizada pela expansão do cultivo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 2, p. 576-594. 2020
- MEAURIO, M. et al. Long-term and event-scale sub-daily streamflow and sediment simulation in a small forested catchment. **Hydrological Sciences Journal**, v. 66, n. 5, p. 862-873, 2021. DOI: 10.1080/02626667.2021.1883620.
- MERRITT, W.S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. 2003. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling & Software**, Oxford, v. 18, p. 761-799.
- MOR, R. C. A. M. **Análise de processos hidrológicos em bacias de rios intermitentes no semiárido mineiro**. 2012. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.
- MORGAN, R. P. C. et al. **The European Soil Erosion Model (EUROSEM): Documentation and User Guide**. Silsoe College: Cranfield University, 1998. 30 p.
- MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.
- MORIASI, D. N. et al. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. **Trans. ASABE**, v.58, n.6, p.1763-1785, 2015. DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models' part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.
- NDIWE, G. et al. Soil management strategies to mitigate soil erosion: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 307, p. 114186, 2022.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and Water Assessment Tool – User Manual, Version 2000**. Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Texas, 2002. 472p.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation, Version 2005**. Texas Water Resources Institute, Texas A&M University System, College Station, Texas. 2005. 476p.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and Water Assessment Tool - Input/Output File Documentation, Version 2009**. Technical Report, n. 365. Texas Water Resources Institute, Texas A&M University System, College Station, Texas, 2010. 604p.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation, Version 2009**. Texas Water Resources Institute, Texas A&M University System, College Station, Texas, Technical Report No. 406, 2011. 618p.

NEVES, F. F., SILVA, F. G. B.; CRESTANA, S. Comparação entre três métodos de evapotranspiração potencial aplicados a duas sub-bacias hidrográficas de Descalvado – SP. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa. **Anais**, 2005. CD Rom.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2.ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 422 p.

OLIVEIRA, F. F.; SANTOS, R. E. S. dos; ARAUJO, R. da C. de. PROCESSOS EROSIVOS: DINÂMICA, AGENTES CAUSADORES E FATORES CONDICIONANTES. **Rev. Bras. de Iniciação Científica (RBIC)**, Itapetininga, v. 5, n.3, p. 60-83, abr./jun., 2018.

OLIVEIRA, L. L. de; ZOLIN, C. A.; FRITZSONS, E. Impactos da mudança do uso e cobertura da terra nos processos hidrológicos em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, n. 3, p. 1-12, 2020.

OLIVEIRA, N. T. de. **Influência da palha no balanço hídrico em lisímetros**. 2006, 99f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

OLIVEIRA, N. T. de; CASTRO, N. M. dos R.; GOLDENFUM, J. A. Influência da Palha no Balanço Hídrico em Lisímetros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, n. 2, p. 93-103, 2010.

PAIVA, E. M. C. D. Métodos de estimativa da produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas. In: PAIVA, J. B. D; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2003. 628 p.

PAN, S.-Y.; WANG, H.-H.; LIN, Y.-H.; HUANG, S.-T. Erosion Control Techniques for Sloping Agricultural Land. **Water**. 2021.

PEIXOTO, R. A. O. et al. Determinação da relação entre vazões líquida e sólida e análise de fatores que influenciam a dinâmica do transporte de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio Jordão (UPGRH-PN 1). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 6, p. 921-931, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-4152202020180137>.

- PEREIRA, M. A. F. **Processos hidrossedimentológicos em diferentes escalas espaço temporais no Bioma Mata Atlântica**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.
- POLYAKOV, V. O.; NEARING, M. A. Sediment transport in rill flow under deposition and detachment conditions. **Catena**, Amsterdam, v.51, n.1, p.33-43, 2003.
- PRESS, P. et al. **Para entender a Terra**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- REUNGSANG, P. et al. **Calibration and validation of SWAT for the upper Maquoketa River Watershed**. Intern. J. Agric. Eng., 16:35-48, 2009.
- RITTER, J. Soil Erosion - **Causes and Effects**. OMAFRA Factsheet, n. 87-040, 2012.
- SALOMONS, W.; BRILS, J. **Contaminated Sediments in European River Basins**. 2004. 80p.
- SÁNCHEZ, L. H. **Avaliação de Impacto Ambiental: Conceitos e Métodos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 496 p.
- SANTOS, L. L. Modelos hidráulicos-hidrológicos: Conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, p. 1-19, 2009.
- SARI, V. **Monitoramento e modelagem da produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica no noroeste do Rio Grande do Sul**. 2017. 312f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- SARI, V.; CASTRO, N.M. dos R.; PEDROLLO, O.C. Estimate of suspended sediment concentration from monitored data of turbidity and water level using artificial neural networks. **Water Resources Management**, v. 31, n. 15, p. 4909-4923, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1785-4>.
- SARMENTO, L.; KOIDE, S. Análise de Incertezas em modelos hidrológicos. XIV World Water Congress, 25-29 set. 2011, Pernambuco, Brasil.
- SCHMITT, T. C. **Calibração e validação da vazão e da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Taboão/RS, usando diferentes modelos de infiltração**. 2021. 93f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.
- SHIVHARE, N.; DIKSHIT, P. K. S.; DWIVEDI, S. B. A Comparison of SWAT Model Calibration Techniques for Hydrological Modeling in the Ganga River Watershed. **Engineering** v.4, p.643–652, 2018.
- SILVA, P. M. O. **Modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela, Alto Rio Grande, MG**. 2006. 155 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

SOROOSHIAN, S. 1991. Parameter estimation, model identification and model validation: conceptual type models. In: BOWLES, D.S.; O'CONNEL, P.E. (Ed.). **Recent advances in the modelling of hydrological systems**. Dordrecht: Kluwer Academic. p. 443-467.

SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. Model Calibration. In: SINGH, V. P. **Computer Models of Watershed Hydrology**, Water Resources Publication, 1995.

SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G. Integration of a basin-scale water quality model with GIS. **Water Research**, v. 30, p. 453-462, 1994.

TEIXEIRA, L. C. et al. Artificial Neural Network and Fuzzy Inference System Models for Forecasting Suspended Sediment and Turbidity in Basins at Different Scales. **Water Resources Management**, v. 34, p. 3709-3723, 2020. DOI://doi.org/10.1007/s11269-020-02647-9.

TOLEDO, A. M. A. **Evolução espaço-temporal da estrutura da paisagem e sua influência na composição química das águas superficiais dos ribeirões Piracicamirim e Cabras (SP)**. 2001. 94 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

TONELLO, K. C. **Análise Hidroambiental da Bacia Hidrográfica da Cachoeira das Pombas**, Guanhães. Viçosa, Minas Gerais: Universidade Federal de Viçosa, 2005.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3.ed., Porto Alegre: Ed da UFRGS/ABRH, 2004. 943 p. (Coleção ABRH de recursos hídricos, v.4).

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. 2 ed., Porto Alegre: Ed. da UFRGS/ ABRH, 2005. 678p.

UZEIKA, T. **Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural**. 2009. 129f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2009.

VAN GRIENSVEN, A. et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multivariable catchment models. **Journal of Hydrology**, v. 324, n. 1/4, p. 10-23, 2006.

VARGAS, M. M. et al. Potencial do modelo hidrológico LISEM para representação de hidrogramas de cheias em uma bacia hidrográfica no sul do Brasil. In: XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2019, Foz do Iguaçu.

VESTENA, L. R. **Análise da relação entre a dinâmica de áreas saturadas e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica por meio de monitoramento e modelagem**. 2008. 268 p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

VIERO, A. C. **Análise da geologia, geomorfologia e solos no processo de erosão por voçorocas: bacia do Taboão/RS**. 2004, 119f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

VIJI, R.; PRASANNA, P.; ILANGOVAN, R. Modified SCS-CN and Green-Ampt Methods in Surface Runoff Modelling for the Kundahpallam Watershed, Nilgiris, Western Ghats, India. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 677-684, 2015.

WALLING, D. E. Linking the field to the river: sediment delivery from agricultural land. In: BOARDMAN, J.; FOSTER, I. D. L.; DEARING, J. A. **Soil Erosion on Agricultural Land**. Chichester: Wiley, 1990. p. 129-152.

WHEATER, H.S.; JAKEMAN, A.J.; BEVEN, K.J. 1993. Progress and directions in rainfall-runoff modeling. In: JAKEMAN, A.J.; BECK, M.B.; MCALEER, M.J. (Ed.). **Modelling change in environmental systems**. Chichester: John Wiley. p. 101-132.

WILLIAMS J R. et al. History of model development at Temple, **Hydrol Sci J**, 2008; 53(5): 948–960.

WILLIAMS, J. R. **Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor**. In: Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources. Oxford: USDA. ARS-S-40, 1975. p.244-252.

WILLIAMS, J.R. SPNM, a model for predicting sediment, phosphorus, and nitrogen yields from agricultural basins. **Water Resources Bulletin**, v. 16, n. 5, p. 843-848, 1980.

WINCHELL, M. et al. (2008). **ArcSWAT 2.1 Interface for SWAT2005: User's Guide**. Blackland Research Center: Texas Agricultural Experiment Station, Temple, 458 p.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses**. Guide to Conservation Farming. US Department of Agriculture Handbook, 1978. 58p.

YANG, C. T. 1996. Sediment Transport Theory and practice. **The McGraw-Hill Companies**, Inc., New York.

YANG, X. et al. Effects of different soil management practices on soil erosion and nutrient loss on the Loess Plateau of China. **Catena**, v. 162, p. 360-367. 2018

YANG, X. et al. Comparison of daily and sub-daily SWAT models for daily streamflow simulation in the Upper Huai River Basin of China. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 30, p. 959-972, 2016. DOI 10.1007/s00477-015-1099-0.

ZABALETA, A.; ANTIGUEDAD, I. Streamflow response of a small forested catchment on different timescales. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, p. 211-223, 2013. DOI: www.hydrol-earth-syst-sci.net/17/211/2013/ doi:10.5194/hess-17-211-2013.

ZABALETA, A.; MEAURIO, M.; RUIZ, E.; ANTIGUEDAD I. Simulation Climate Change Impact on Runoff and Sediment Yield in a Small Watershed in the Basque Country, Northern Spain. **Journal of Environmental Quality**. p. 235 - 245. 2014.

ZABALETA, A.; MARTÍNEZ, M.; URIARTE, J. A.; ANTIGUEDAD I. Factors controlling suspended sediment yield during runoff events in small headwater catchments of the Basque Country. **Catena**, v. 71, n. 1, p. 179-190. 2007

ZANETTI, S. S. **Modelagem hidrológica em microbacia hidrográfica da bacia do rio Paraíba do Sul**. 2007. 135p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 2007.

ZEN, S. de. et al. **PECUÁRIA DE CORTE BRASILEIRA: IMPACTOS AMBIENTAIS E EMISSÕES DE GASES EFEITO ESTUFA (GEE)**. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - ESALQ/USP, Piracicaba, 2008. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/documentos/texto/pecuaria-de-corte-brasileira-impactos-ambientais-e-emissoes-de-gases-efeito-estufa-gee.aspx>. Acesso em: 22 jan. 2023.

ANEXO A - PRINCIPAIS EQUAÇÕES PARA SIMULAÇÃO DOS PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS NO MODELO SWAT

Neste anexo, serão destacadas as principais equações empregadas no trabalho em questão. Informações mais aprofundadas sobre esses processos e os parâmetros de entrada do modelo podem ser consultadas em Neitsch et al. (2002, 2005, 2010, 2011) e Arnold et al. (2012a).

MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH

A equação de Penman-Monteith combina componentes que consideram a energia necessária para sustentar a evaporação, a intensidade do mecanismo necessário para remover o vapor d'água e termos de resistência aerodinâmica e de superfície (NEITSCH et al., 2011). A equação de Penman-Monteith é:

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{air} \cdot c_p \cdot [e_z^o - e_z]}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)} \quad (1)$$

Onde: λE é a densidade de fluxo de calor latente ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); E é a taxa de evaporação de profundidade (mm d^{-1}); Δ é a declividade da curva da pressão-temperatura do vapor de saturação, de/dT ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); H_{net} é a rede de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); G é a densidade do fluxo de calor para o solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); ρ_{air} é a densidade do ar (kg m^{-3}); c_p é o calor específico em pressão constante ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); e_z^o é a pressão do vapor de saturação de ar na altura z (kPa); e_z é a pressão do vapor de água de ar na altura z (kPa); γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); r_c é a resistência do dossel de planta (s m^{-1}); r_a é a resistência de difusão da camada de ar (resistência aerodinâmica) (s m^{-1}).

Para plantas bem irrigadas em condições de estabilidade atmosférica neutra e assumindo perfis de vento logarítmicos, a equação de Penman-Monteith pode ser escrita (JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990):

$$\lambda E_t = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \gamma \cdot K_1 \cdot (0.622 \cdot \lambda \cdot \rho_{air} / P) \cdot (e_z^o - e_z)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)} \quad (2)$$

Onde: λ é o calor latente de vaporização (MJ kg^{-1}); E_t é a taxa de transpiração máxima (mm d^{-1}); K_1 é uma dimensão coeficiente necessária para assegurar que os dois termos no numerador tenham as mesmas unidades (para u_z em m s^{-1} , $K_1 = 8.64 \times 10^4$); e P é a pressão atmosférica (kPa).

MÉTODO HARGREAVES

O método de Hargreaves foi originalmente derivado a partir de oito anos de dados de evapotranspiração de Davis, Califórnia (HARGREAVES, 1975). Várias melhorias foram feitas na equação original (HARGREAVES; SAMANI, 1982 e 1985), e a forma utilizada no SWAT foi publicada em 1985 (HARGREAVES; HARGREAVES; RILEY, 1985):

$$\lambda E_o = 0.0023 \cdot H_0 \cdot (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} \cdot (\bar{T}_{av} + 17.8) \quad (3)$$

Onde: λ é o calor latente de vaporização (MJ kg^{-1}); E_o é a evapotranspiração potencial (mm d^{-1}); H_0 é a radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); T_{mx} é a temperatura máxima do ar para um dado dia ($^{\circ}\text{C}$); T_{mn} é a temperatura mínima do ar para um dado dia ($^{\circ}\text{C}$); e T_{av} é a temperatura média do ar para um dado dia ($^{\circ}\text{C}$).

MÉTODO DE MUSKINGUM

Conforme Neitsch et al. (2011), o método de roteamento de Muskingum modela o volume de armazenamento em um comprimento de canal como uma combinação de armazenamentos em forma de cunha e prisma.

Quando uma onda de inundação avança para um seguimento do rio, o fluxo de entrada excede o fluxo de saída, assim uma cunha em armazenamento é produzida. À medida que a onda de inundação retrai, o fluxo de saída excede o de entrada no seguimento do rio e uma cunha negativa é produzida. Além do armazenamento em cunha, o seguimento do rio contém um prisma de armazenamento formado por um volume da seção transversal constante ao longo do rio (NEITSCH et al., 2011)

Como definido pela equação de Manning, assume-se que a área da seção transversal do fluxo é diretamente proporcional à descarga para um dado seguimento de rio. Usando essa suposição, o volume de armazenamento do prisma pode ser expresso como uma função da

descarga, $K \cdot q_{out}$, em que K consiste na razão de armazenamento para descarga e tem a dimensão de tempo. De maneira similar, o volume de armazenamento em cunha pode ser expresso como $K \cdot X \cdot (q_{in} - q_{out})$, em que X consiste no fator de ponderação que controla a importância relativa ou os fluxos de entrada e saída na determinação do armazenamento em um rio. Somando esses termos obtém-se um valor para o armazenamento total:

$$V_{stored} = K \cdot (X \cdot q_{in} + (1 - X) \cdot q_{out}) \quad (4)$$

Onde: V_{stored} é o volume de armazenamento (m^3); q_{in} é a taxa de entrada do escoamento (m^3/s); q_{out} = taxa de descarga (m^3/s); K é a constante de armazenamento para o canal (s); e X é o fator de ponderação.

O fator de ponderação, X tem um limite inferior de 0,0 e um limite superior de 0,5. Esse fator é uma função do armazenamento em cunha. Para armazenamento do tipo-reservatório não existe uma cunha e $X=0,0$. Para uma cunha-cheia, $X= 0,5$. Para rios, X vai cair entre 0,0 e 0,3 com um valor médio próximo de 0,2.

A definição para o volume de armazenamento na equação 4 pode ser incorporada na equação de continuidade e simplificada para:

$$q_{out,2} = C_1 \cdot q_{in,2} + C_2 \cdot q_{in,1} + C_3 \cdot q_{out,1} \quad (5)$$

Onde: $q_{in,1}$ é a taxa do fluxo de entrada no início do intervalo de tempo (m^3/s); $q_{in,2}$ é a taxa do fluxo de entrada no final do intervalo de tempo (m^3/s); $q_{out,1}$ consiste na taxa do fluxo de saída no início do intervalo de tempo (m^3/s); $q_{out,2}$ consiste na taxa do fluxo de saída no final do intervalo de tempo (m^3/s); e

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t} \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t} \quad (7)$$

$$C_3 = \frac{2 \cdot K \cdot (1 - X) - \Delta t}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t} \quad (8)$$

Onde $C_1 + C_2 + C_3 = 1$. Para expressar todos os valores em unidades de volume, os dois lados da equação 5 são multiplicados pelo intervalo de tempo

$$V_{out,2} = C_1 \cdot V_{in,2} + C_2 \cdot V_{in,1} + C_3 \cdot V_{out,1} \quad (9)$$

Para manter a estabilidade numérica e evitar a computação de fluxos de saída negativos, a condição a seguir deve ser realizada:

$$2 \cdot K \cdot X < \Delta t < 2 \cdot K \cdot (1 - X) \quad (10)$$

O valor para o fator de ponderação X é dado pelo usuário. O valor para a constante do tempo de armazenamento é estimado como:

$$K = coef_1 \cdot K_{bnkfull} + coef_2 \cdot K_{0,1bnkfull} \quad (11)$$

Onde: K é a constante do tempo de armazenamento para o segmento do rio (s); $coef_1$ e $coef_2$ são coeficientes de ponderação de entrada colocados pelo usuário; $K_{bnkfull}$ é a constante do tempo de armazenamento calculado para o seguimento do rio com fluxos de calha cheia (s); e $K_{0,1bnkfull}$ é a constante do tempo de armazenamento calculada para o seguimento do rio com um décimo do fluxo da calha cheia (s). Para calcular $K_{bnkfull}$ e $K_{0,1bnkfull}$ uma equação desenvolvida por Cunge (1969) é usada:

$$K = \frac{1000 \cdot L_{ch}}{c_k} \quad (12)$$

Onde: K é a constante do tempo de armazenamento (s); L_{ch} é o comprimento do canal (km); e c_k é a celeridade correspondente ao fluxo para uma dada profundidade (m/s). Celeridade é a velocidade na qual uma variação na taxa de fluxo se desloca ao longo do canal. É definida como:

$$c_k = \frac{d}{dA_{ch}}(q_{ch}) \quad (13)$$

Em que a vazão, q_{ch} é definida pela equação de Manning's. Diferenciando a equação, com relação a área da seção transversal, se obtém:

$$c_k = \frac{5}{3} \cdot \left(\frac{R_{ch}^{2/3} \cdot slp_{ch}^{1/2}}{n} \right) = \frac{5}{3} \cdot v_c \quad (14)$$

Onde: c_k consiste na celeridade (m/s); R_{ch} o raio hidráulico para uma dada profundidade do fluxo (m); slp_{ch} consiste no declive ao longo do comprimento do canal (m/m); n compreende o coeficiente de Manning's para o canal; e v_c a velocidade do fluxo (m/s).

MÉTODO DO ARMAZENAMENTO VARIÁVEL

Este método, desenvolvido por Williams (1975) e considerado neste trabalho, é uma das opções presentes no SWAT para efetuar o direcionamento das águas nos canais. O direcionamento para cada segmento de canal obedece à Equação 15:

$$V_{in} - V_{out} = \Delta V_{stored} \quad (15)$$

Onde: V_{in} representa o volume de entrada (m^3); V_{out} representa o volume de saída (m^3) e ΔV_{stored} representa o volume armazenado (m^3).

Ao analisar a Equação 15 em função do tempo, esta pode ser escrita como a Equação 16:

$$\frac{q_{in,1} + q_{in,2}}{2} + \frac{V_{stored,1}}{\Delta t} - \frac{q_{out,1}}{2} = \frac{V_{stored,2}}{\Delta t} - \frac{q_{out,2}}{2} \quad (16)$$

Onde: Δt representa o intervalo de tempo considerado (s); $q_{in,1}$ representa a taxa de entrada no início do intervalo (m^3/s); $q_{in,2}$ representa a taxa de entrada no final do intervalo (m^3/s); $q_{out,1}$

representa a taxa de saída no início do intervalo (m^3/s); $q_{out,2}$ representa a taxa de saída no final do intervalo (m^3/s); $V_{stored,1}$ representa o volume armazenado no início do intervalo (m^3/s); e $V_{stored,2}$ representa o volume armazenado no final do intervalo (m^3/s).

De acordo com Neitsch et al (2011), o tempo de translação é calculado pela divisão do volume de água no canal pela taxa de fluxo, representado pela Equação 17:

$$TT = \frac{V_{stored}}{q_{out}} = \frac{V_{stored,1}}{q_{out,1}} = \frac{V_{stored,2}}{q_{out,2}} \quad (17)$$

Onde: TT representa o tempo de translação (s); V_{stored} representa o volume armazenado (m^3); q_{out} representa a taxa de fluxo de saída (m^3/s).

A relação entre o tempo de translação e o coeficiente de armazenamento pode ser expresso pela Equação 18.

$$SC = \frac{2 \cdot \Delta t}{2 \cdot TT + \Delta t} \quad (18)$$

E, a partir desta, têm-se a Equação 19, apresentando o volume de saída de cada segmento de canal ao término de um intervalo de tempo.

$$V_{out,2} = SC \cdot (V_{in} + V_{stored,1}) \quad (19)$$

EQUAÇÃO DE BAGNOLD SIMPLIFICADA (MÉTODO DEFAULT)

O transporte de sedimentos é considerado através da operação simultânea dos processos de deposição e degradação. Williams (1980) adaptou o método proposto por Bagnold (1977). Tal método ficou conhecido como Equação de Bagnold Simplificada. Nele a quantidade máxima de sedimento que pode ser transportada de um curso d'água é função da velocidade mais alta do canal. A Equação 20 descreve essa consideração.

$$CONC_{sed,ch,mx} = C_{sp} \cdot v_{ch,pk}^{spexp} \quad (20)$$

Onde: $CONC_{sed,ch,mx}$ é a concentração máxima de sedimento que pode ser transportada pela água (ton/m ou kg/L); C_{sp} é um coeficiente definido pelo usuário; $v_{ch,pk}$ é a maior velocidade do canal (m/s); e $spexp$ é um expoente definido pelo usuário. O expoente, $spexp$, normalmente varia entre 1,0 e 2,0 e foi ajustado para 1,5 na equação original de Bagnold sobre a força da corrente (ARNOLD et al.,1995).

EQUAÇÃO DE YANG

Yang (1996) relacionou a carga total ao poder total do fluxo unitário em excesso, expressado como o produto da velocidade e da inclinação. Equação desenvolvida para rios com granulometria variando de areia a cascalho.

$$Sed_{out} = Sed_{ch} * \frac{V_{out}}{V_{ch}} \quad (21)$$

Onde: Sed_{out} é a quantidade de sedimento transportado para fora da extensão do canal ou segmento (toneladas); Sed_{ch} é a quantidade de sedimento suspensos na extensão do canal (toneladas); V_{out} é o volume de escoamento de saída da extensão do canal durante determinado tempo (m^3); e V_{ch} é o volume de água na extensão do segmento (m^3).