Universidade Federal do Espírito Santo
Centro Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS HIDROLÓGICOS EM FUNÇÃO DE SUAS ESTRUTURAS E PARAMETRIZAÇÃO E DE RESULTADOS DE APLICAÇÕES EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

Vitória - ES
2019

Thais Covre Delboni

ANÁLISE COMPARATIVA DE MODELOS HIDROLÓGICOS EM FUNÇÃO DE SUAS ESTRUTURAS E PARAMETRIZAÇÃO E DE RESULTADOS DE APLICAÇÕES EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na área de concentração de Recursos Hídricos. Orientador: Prof. Ph.D. Antônio Sérgio Ferreira Mendonça. Co-orientador Prof.D.Sc. Diogo Buarque

.

Vitória - ES
2019

RESUMO

A escolha de modelos hidrológicos para simulação de vazões em bacias hidrográficas é um desafio, e a comparação entre modelos e seus desempenhos pode ajudar pesquisadores na seleção do modelo adequado para condições específicas. Neste estudo, foram analisadas teoricamente as características dos modelos hidrológicos distribuídos *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) e Modelo de Grandes Bacias (MGB) quanto às representações dos processos e complexidades. Os desempenhos dos dois modelos foram avaliados e comparados considerando aplicações nas simulações de vazões na bacia do Rio Itapemirim, com área de drenagem aproximadamente 6.000 km^2, localizada no sul do estado do Espírito Santo, Brasil. Os desempenhos dos modelos foram analisados para sete seções transversais de controle na bacia, considerando registros de vazões diárias para o período de tempo 1999 a 2013.

Análise de sensibilidade dos parâmetros dos modelos permitiu identificação daqueles mais influentes contribuindo para a calibração dos modelos. Ambos foram calibrados considerando um período de seis anos e, em seguida, validados utilizando um período independente de seis anos, sendo comparadas vazões diárias simuladas e observadas. As médias dos coeficientes de Nash-Sutcliffe (NSE and NSElog) e de determinação (R2) estimados, considerando as sete estações de controle na bacia do rio Itapemirim, tanto para o período de calibração como para o de validação, para as simulações com o modelo MGB foram em torno de dez por cento maiores do que as correspondentes ao SWAT. Considerando critérios de classificação elaborados por Moriasi et al. (2015), estes valores de coeficientes indicam que as simulações realizadas com o modelo SWAT podem ser classificadas como satisfatórias e as realizadas com o MGB como boas. Porém, quando analisados os erros percentuais relativos a reproduções, principalmente de vazões máximas e mínimas anuais, estes se apresentaram altos para muitas seções de controle. Desta forma, critérios empíricos de classificação de desempenhos de modelos, como o proposto por estes autores, devem ser utilizados com cautela e considerando os objetivos da modelagem. As diferenças nos desempenhos dos modelos podem ser atribuídas principalmente aos mecanismos de geração e produção de escoamento dos dois modelos. Resultados não permitem concluir que qualquer dos modelos hidrológicos utilizados

seja superior ao outro para todos os locais nem para todas as medidas de desempenho de modelos. Não há consenso nas pesquisas em modelagem de chuva-vazão sobre qual estrutura de modelo deve ser preferida, uma vez que fatores como formulação do modelo, parametrização e habilidade do modelador possuem grande influência nas precisões das simulações.
Palavras - chave: SWAT. MGB. Modelo hidrológico. Comparação de modelos. Modelo distribuído.

ABSTRACT

The selection of hydrological models for flow simulation in a watershed is a challenge and comparison between models and their performances can help researchers to choose the appropriate model for specific conditions. In this study, distributed hydrological models Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and *Modelo de Grandes Bacias* (MGB) characteristics were theoretically analyzed with respect to hydrologic processes representations and complexities. Models performances were evaluated and compared considering applications in Itapemirim River basin flow simulations, This basin presents an approximately 6,000 km^2 drainage area and is located in the south of Espírito Santo state, Brazil. The models performances analysis was made for seven rivers control sections, considering 1999 to 2013 daily flows records.

Models parameters sensitivity analysis allowed the identification of the most influential parameters contributing to the models calibration. Both models were calibrated for a six years data period and then validated by using an independent six years data period. Simulated and observed daily flows were compared. Average Nash-Sutcliffe efficiency (NSE and NSElog) and determination (R2) coefficients, considering the seven control stations located in the Itapemirim basin, for calibration and validation periods, estimated for MGB simulations were about ten percent higher than those estimated for SWAT simulations. Considering the classification criteria developed by Moriasi et al. (2015), these coefficient values indicate that the simulations performed with SWAT model can be classified as satisfactory and those performed with MGB as good. However, the percentage errors related mainly to maximum and minimum annual flows reproductions were high for many control sections. Thus, empirical criteria for model performance classification, such as the proposed by these authors, should be used with caution and considering modeling objectives. Differences in model performances can be mainly attributed to the two models flow generation and production mechanisms. The results do not allow concluding that either of the hydrological models is superior to the other for all sites or considering all model performance measures. There is no consensus in rain-flow modeling research on which model structure should be preferred, since factors such as model formulation, parameterization, and modeler ability have large influence on the simulations accuracy.

Key words: SWAT. MGB. Hydrologic model. Model comparison. Distributed model.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Métodos utilizados pelo SWAT e MGB no cálculo das etapas de precipitação, evapotranspiração, geração e propagação de escoamento. 33
Tabela 2 – Critérios de avaliação de desempenho final para medidas estatísticas em modelos de bacias hidrográficas 46
Tabela 3 – Informações relativas aos postos pluviométricos 54
Tabela 4 – Informações a respeito dos postos meteorológicos.....56
Tabela 5 – Média mensal da velocidade do vento (m/s) para as estações consideradas. 57
Tabela 6 – Média mensal da umidade relativa para as estações consideradas.....58
Tabela 7 – Média mensal da temperatura mínima (°C) para as estações consideradas. 58
Tabela 8 – Média mensal da temperatura máxima (°C) para as estações consideradas 58
Tabela 9 – Informações relativas aos postos fluviométricos considerados 62
Tabela 10 – Média das vazões mensais (m³/s) para o período 1999 a 2013, para as estações consideradas. 62
Tabela 11 – Vazão específica média (L/s.km²) para o período 1999 a 2013, para as estações consideradas. 63
Tabela 12 – Parâmetros alterados de acordo com o SWAT-CHECK.....67
Tabela 13 – Parâmetros da análise de sensibilidade relacionados à produção de água. 69
Tabela 14 – Aspectos gerais das aplicações dos modelos SWAT e MGB.....79
Tabela 15 – Sensibilidade global dos parâmetros à vazão no SWAT 81
Tabela 16 – Valores dos parâmetros após a calibração com o SWAT-CUP.....83
Tabela 17 – Média, máximo e mínimo das vazões diárias (m³/s) e erro médio para cada ano do período de calibração na sub-bacia delimitada pelo posto 57370000. .85
Tabela 18 – Média, máximo e mínimo das vazões diárias (m³/s) e erro médio para cada ano do período de calibração na sub-bacia delimitada pelo posto 57580000. .86
Tabela 19 – Erros médios percentuais, relativos às vazões médias, máximas e mínimas anuais, o período de calibração. 89

Tabela 20 – Valores das estatísticas de precisão para cada um dos pontos de controle resultantes da aplicação dos modelos na simulação hidrológica da bacia do rio Itapemirim, no período de calibração. 90
Tabela 21 – Estatísticas de precisão resultantes da aplicação dos modelos na simulação hidrológica na bacia do rio Itapemirim, para período de calibração.....92
Tabela 22 – Média, máximo e mínimo das vazões diárias (m³/s) e erro médio para cada ano do período de validação na sub-bacia relativa ao posto 57370000.....99
Tabela 23 – Média, máximo e mínimo das vazões diárias (m³/s) e erro médio para cada ano do período de validação na sub-bacia relativa ao posto 57580000.....100
Tabela 24 – Erros médios percentuais, relativos às vazões médias, máximas e mínimas anuais, para o período de validação. 102
Tabela 25 – Valores das estatísticas de precisão para cada um dos pontos de controle resultantes da aplicação dos modelos na simulação hidrológica da bacia do rio Itapemirim, no período de validação.. 103
Tabela 26 – Estatísticas de precisão resultantes da aplicação dos modelos na simulação hidrológica na bacia do rio Itapemirim, para período de validação.....104
Tabela 27 – Erro percentual médio trimestral para o período de calibração. 113
Tabela 28 – Erro percentual médio trimestral para o período de validação 113
Tabela 29 – Média do módulo do erro percentual médio por trimestre no período de calibração 114
Tabela 30 – Média do módulo do erro percentual médio por trimestre no período de validação 114
Tabela 31 – Coeficiente de determinação (R2) entre os modelos SWAT e MGB.....116

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma da metodologia 47
Figura 2 – Modelo Digital de Elevação da bacia do Rio Itapemirim 50
Figura 3 – Percentagens relativas às diferentes classes de uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim consideradas para os modelos SWAT e MGB 52
Figura 4 – Mapa de localização das estações pluviométricas 55
Figura 5 – Média das precipitações mensais (m^3/s) para o período 1999 a 2013, para as estações consideradas 55
Figura 6 – Mapa de localização das estações climatológicas 57
Figura 7 – Média mensal da velocidade do vento (m/s) para as estações consideradas 59
Figura 8 – Média mensal da umidade relativa para as estações consideradas 60
Figura 9 – Média mensal da temperatura máxima (°C) para as estações consideradas 60
Figura 10 – Média mensal da temperatura mínima (°C) para as estações consideradas 61
Figura 11 – Localização das estações fluviométricas 62
Figura 12 – Média das vazões mensais (m^3/s) para o período 1999 a 2013, para as estações consideradas 63
Figura 13 – Sensibilidade global dos parâmetros à vazão no SWAT 81
Figura 14 – Comparação das vazões médias, máximas e mínimas observadas e simuladas pelos modelos- Estação fluviométrica 57370000 - Período de calibração 85
Figura 15 – Comparação das vazões médias, máximas e mínimas observadas e simuladas pelos modelos- Estação fluviométrica 57580000 - Período de calibração 86
Figura 16 – Desempenho dos modelos SWAT e MGB em termos de R2 durante o período de calibração 93
Figura 17 – Desempenho dos modelos SWAT e MGB em termos de NSE durante o período de calibração 94
Figura 18 – Desempenho dos modelos SWAT e MGB em termos de logNSE durante o período de calibração 94

Figura 19 – Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo MGB - Estação fluviométrica 57370000 - Período de calibração 95
Figura 20 – Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo SWAT - Estação fluviométrica 57370000 - Período de calibração 95
Figura 21 – Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo MGB - Estação fluviométrica 57370000 - Período de calibração 96
Figura 22 – Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo SWAT - Estação fluviométrica 57370000 - Período de calibração 97
Figura 23 – Comparação das vazões médias, máximas e mínimas observadas e simuladas pelos modelos- Estação fluviométrica 57370000 - Período de validação...99
Figura 24 – Comparação das vazões médias, máximas e mínimas observadas e simuladas pelos modelos- Estação fluviométrica 57580000 - Período de validação.100
Figura 25 – Desempenho dos modelos SWAT e MGB em termos de NSE durante o período de validação 106
Figura 26 – Desempenho dos modelos SWAT e MGB em termos de R2 durante o período de validação 106
Figura 27 – Desempenho dos modelos SWAT e MGB em termos de logNSE durante o período de validação 107
Figura 28 – Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo MGB - Estação fluviométrica 57370000 - Período de validação.....107
Figura 29 – Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo SWAT - Estação fluviométrica 57370000 - Período de validação.....108
Figura 30 – Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo MGB - Estação fluviométrica 57580000 - Período de validação.....109
Figura 31 – Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo SWAT - Estação fluviométrica 57580000 - Período de validação.....110
Figura 32 – Comparação entre vazões mensais estimadas pelos modelos SWAT e MGB para os períodos de calibração - Ponto de monitoramento 57370000.....115
Figura 33 – Comparação entre vazões mensais estimadas pelos modelos SWAT e MGB para os períodos de validação - Ponto de monitoramento 57370000.....115
Figura 34 – Comparação entre vazões mensais estimadas pelos modelos SWAT e MGB para os períodos de calibração - Ponto de monitoramento 57580000.....115

Figura 35 – Comparação entre vazões mensais estimadas pelos modelos SWAT e MGB para os períodos de validação - Ponto de monitoramento 57580000 116
Figura 36 – Correlação entre vazões estimadas pelos modelos SWAT e MGB para os períodos de calibração e validação - Ponto de monitoramento 57370000 117
Figura 37 – Correlação entre vazões estimadas pelos modelos SWAT e MGB para os períodos de calibração e validação - Ponto de monitoramento 57580000 117

LISTA DE SÍMBOLOS

$SW_{i,j}^{k}$	Quantidade de água armazenada no solo no final do intervalo de tempo k, na URH j da mini-bacia i (mm)
$SW_{i,j}^{k-1}$	Quantidade de água armazenada no solo no final do intervalo de tempo k-1, na URH j da mini-bacia i (mm)
P_i	Parcela da precipitação que atinge o solo (mm*Δt^{-1})
$ET_{i,j}$	Evapotranspiração a partir do solo (mm*Δt^{-1})
$Q_{s_{i,j}}$	Escoamento superficial (mm*Δt^{-1})
$Dbas_{i,j}$	Percolação ou recarga do aquífero (mm*Δt^{-1})
Δt	Incremento de tempo.
SW_t	Quantidade final de água no solo (mm)
SW_0	Quantidade inicial de água no solo (mm)
R_v	Precipitação total diária no dia ‘t’ (mm)
Q_s	Escoamento superficial no dia ‘i’
$W_{seepage}$	Quantidade de água que entra e é armazenada no solo no dia ‘i’
ET	Evapotranspiração total diária no dia ‘i’ (mm)
Q_{gw}	Vazão de retorno no dia ‘t’ (mm)
t	Tempo (dias)
NSE	Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe
Q_t^{obs}	Vazão observada em campo
Q_t^{calc}	Vazão calculada pelo modelo
$\overline{Q_t^{obs}}$	Média da vazão observada em campo
NSE_{log}	Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe para os logaritmos das vazões
Pbias	Percentagem bias
RMSE	Erro quadrático médio
N	Número total de observações
Wm	Capacidade de armazenamento de água no solo
b	Relação entre armazenamento e saturação
Kint	Parâmetro relacionado ao escoamento sub-superficial
XL	Controla a redução da drenagem intermediária ou sub-superficial do solo

Kbas	Coeficiente de controle do escoamento subterrâneo
CS	Parâmetro de correção do tempo de concentração para drenagem superficial
CAP	Água do reservatório subterrâneo que retorna ao solo
WC	Água do reservatório subterrâneo que retorna ao solo
QB	Condição inicial do modelo
CI	Parâmetro relacionado ao tempo de propagação do escoamento sub-superficial
CB	Parâmetros relacionado ao tempo de propagação do escoamento subterrâneo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
2 OBJETIVOS 18
2.1 OBJETIVO GERAL 18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19
3.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA 19
3.1.1 Tipos de modelos 21
3.2 SWAT E MGB 26
3.2.1 SWAT 27
3.2.2 MGB 29
3.3 CICLO HIDROLÓGICO E EQUAÇÕES UTILIZADAS NO SWAT E NO MGB 32
3.3.1 Precipitação 33
3.3.2 Evapotranspiração 33
3.3.3 Escoamento superficial 34
3.3.4 Propagação da vazão 36
3.4 COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS 38
3.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE 41
3.6 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO 42
3.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS 44
4 MATERIAIS E MÉTODOS 47
4.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS 47
4.2 ÁREA DE ESTUDO 48
4.2.1 Modelo Digital de Elevação (MDE) 49
4.2.2 Tipo e uso e ocupação do solo 50
4.2.3 Dados climáticos 53
4.2.4 Vazão 61
4.3 MODELAGEM COM O MGB 64
4.3.1 Calibração e validação 65
4.4 MODELAGEM COM O SWAT 66
4.4.1 Análise de sensibilidade, calibração, validação 68

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 70
5.1 PROCEDIMENTO PARA ESCOLHA DE MODELOS 70
5.2 ESCOLHA DOS MODELOS UTILIZADOS 72
5.2.1 Atendimento aos critérios de Watson pelo SWAT e MGB 72
5.3 AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS MODELOS 78
5.3.1 Aspectos gerais e recomendação de modelo 78
5.4 SIMULAÇÕES HIDROLÓGICAS 80
5.4.1 Análise de sensibilidade 80
5.4.2 Análise de desempenho dos modelos 82
5.4.3 Análise comparativa dos resultados 118
6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES 120
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 122

Anexo A – Usos do solo 142
Anexo B – Parâmetros relativos à vegetação 144
Anexo C – Tipos de solo 146
Anexo D – Parâmetros de tipo de solo 149
Anexo E – Vazões médias, máximas e mínimas - período de calibração 156
Anexo F – Comparação entre vazões observadas e simuladas - período de calibração 161
Anexo G – Correlação entre vazões observadas e simuladas pelo SWAT e pelo MGB - período de calibração 171
Anexo H – Vazões médias, máximas e mínimas - período de validação 174
Anexo I – Comparação entre vazões observadas e simuladas - período de validação 179
Anexo J – Correlação entre vazões observadas e simuladas pelo SWAT e pelo MGB - período de validação 189
Anexo K – Correlação entre vazões simuladas pelo SWAT e pelo MGB 192

1 INTRODUÇÃO

Modelos são representações simplificadas de sistemas do mundo real. Durante anos eles vêm sendo desenvolvidos para lidar com uma grande variedade de problemas, alguns mais relacionados com pesquisas e outros com questões práticas da natureza (SMITH; GEORGAKAKOS; LIANG, 2004). Os objetivos da modelagem são diversos. Existem modelos que foram desenvolvidos com objetivo de simular o movimento dos poluentes e prever os efeitos da mudança de uso do solo e outros para explorar o conhecimento a respeito da física do movimento da água em uma bacia hidrográfica (SINGH; FREVERT, 2006, JAJARMIZADEH; HARUN; SALARPOUR, 2012). Desta forma eles são ferramentas importantes na resolução de problemas relacionados ao meio ambiente e aos recursos hídricos.

Um esforço considerável tem sido realizado na pesquisa e desenvolvimento de modelos hidrológicos (LI; ZHANG, 2008). De início, esses modelos tinham obstáculos como excesso de dados de entrada necessários e baixas capacidades de processamento dos computadores na resolução de numerosas e complexas equações baseadas fisicamente. Os avanços da tecnologia aliviaram algumas restrições relacionadas com dados e barreiras computacionais relacionadas a modelos hidrológicos. Os gastos iniciais de obtenção dos dados ainda devem ser considerados. Porém, uma vez que estes dados são coletados, eles podem ser facilmente transformados em dados úteis para estudos de modelagem (SMITH; GEORGAKAKOS; LIANG, 2004).

Existe uma grande quantidade de modelos hidrológicos e a seleção daqueles que atendam às necessidades específicas e ainda capturem como a incerteza se apresenta não é trivial (KAUFFELDT et al., 2016). Alguns modelos baseiam-se em relações empíricas simples com algoritmos robustos, enquanto outros utilizam equações baseadas fisicamente com soluções numéricas computacionalmente intensivas. Encontrar um modelo para uma aplicação em uma determinada bacia hidrográfica é uma tarefa bastante desafiadora (BORAH; BERA, 2003). Assim sendo, muitos hidrólogos tem mostrado interesse na comparação de modelos hidrológicos com diferentes níveis de complexidade (LI; XU; BELDRING, 2015).

Dependendo do tipo de aplicação são consideradas as características da bacia, a disponibilidade de dados, diferentes escalas espaciais e temporais, conceituações e parametrizações dos modelos. No entanto, em muitas aplicações, a seleção do

modelo parece estar sujeita à prática comum do modelador, sendo que raramente uma seleção objetiva parece ser realizada (NAJAFI et al, 2011). A estrutura do modelo selecionado pode influenciar fortemente nos resultados do estudo, como foi mostrado por Ludwig et al. (2009), Bae et al. (2011), Gosling et al. (2011), Smith et al. (2012), Van Steenbergen e Willems (2012) e Velázquez et al. (2012), entre outros.

A comparação de modelos possibilita a identificação de possíveis fontes de incerteza na modelagem hidrológica por meio da avaliação da sua complexidade, objetivo da simulação, estrutura, entre outros (GAO et al., 2016; STAUDINGER et al., 2011; TE LINDE et al., 2008; VANSTEENKISTE et al., 2013; YANG; HERATH; MUSIAKE, 2000).

Dentre os diversos tipos de modelo, os modelos hidrológicos distribuídos e baseados fisicamente estão cada vez mais sendo utilizados nas avaliações de recursos hídricos, mudanças climáticas e de uso do solo (PEREIRA et al., 2016a; FATICHI et al., 2016; SRINIVASAN; ZHANG; ARNOLD, 2010; TESHAGER et al., 2016; TONG; CHEN, 2002). De forma a entender melhor como os comportamentos dos modelos se relacionam com seus parâmetros e estruturas, dois modelos foram escolhidos para serem analisados em função das suas aplicações, o MGB e o SWAT, o primeiro desenvolvido no Brasil, pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e o segundo pelo USDA-ARS - Serviço de Pesquisa Agrícola do Estados Unidos. Com este estudo, busca-se avaliar a capacidade de ambos modelos de representar vazões observadas em bacias hidrográficas específicas e identificar vantagens e limitações de cada um deles, que devem ser consideradas na seleção para uma aplicação específica.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Maior conhecimento a respeito da modelagem hidrológica chuva-vazão considerando modelos distribuídos e da influência dos processos e complexidades dos modelos nos seus desempenhos na reprodução de vazões.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as equações e parâmetros que governam os modelos SWAT e MGB e examinar como influenciam nos seus desempenhos;
- Para a bacia do rio Itapemirim, identificar e caracterizar os parâmetros mais sensíveis e avaliar e comparar os desempenhos na modelagem;
- Considerando as características, os processos envolvidos e a aplicação dos modelos, indicar aspectos positivos e negativos apresentados na literatura e observados na modelagem;
- Indicar procedimentos para a escolha de modelos apropriados para bacias específicas, considerando aspectos importantes apresentados na literatura.
- Analisar critérios de avaliação de desempenhos de modelos, considerando diferenças entre vazões observadas e simuladas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Modelos hidrológicos são representações simplificadas de partes do mundo real nas quais algumas, mas não todas, características são reproduzidas (DOOGE, 1968). Foram desenvolvidos a fim de servirem como estruturas lógicas idealizadas com linguagem de fácil acesso e uso na simulação de processos. Existem muitos modelos disponíveis, desde aqueles com aplicações para pequenas bacias até modelos globais, modelos de bacias monitoradas e não monitoradas, entre muitos outros.

Devi et al. (2015) define um modelo de chuva-vazão como um conjunto de equações que auxiliam na estimativa da quantidade de chuva que se transforma em escoamento em função de vários parâmetros usados para descrever a bacia hidrográfica. A modelagem do escoamento superficial pode ser difícil, pois o cálculo é complexo e envolve muitas variáveis interconectadas. Além disso, a modelagem possui limitações, uma vez que não existe entendimento completo da representação da complexidade do mundo real (SEMENOVA; BEVEN, 2015). Desta forma, mesmo com acesso a dados meteorológicos perfeitos, modelos podem produzir estimativas incertas (BEVEN, 1989).

A modelagem é utilizada pois não é possível medir tudo em todos os lugares. Além disso, existe necessidade de planejamento com antecedência e compreensão sobre o que pode acontecer sob condições extremas (SEMENOVA; BEVEN, 2015). A modelagem hidrológica é uma das principais ferramentas para o gerenciamento de recursos hídricos, permitindo avaliar, entre outras, as distribuições espaciais e temporais dos fenômenos hidrológicos e simular possíveis efeitos do uso da terra e mudanças climáticas (PONTES et al., 2016). Existem aplicações de modelos hidrológicos em diversos locais e para diversas situações, mas ainda não existem modelos que funcionam em todos os lugares para todas as situações.

Modelos hidrológicos são ferramentas indispensáveis para vários propósitos, incluindo, mas não limitando-se a: previsão de enchentes e secas; avaliações dos recursos hídricos; avaliação dos impactos hidrológicos das atividades humanas ;e compreensão do ciclo hidrológico (BECK et al., 2017). Uma das variáveis mais úteis para a avaliação de modelo hidrológico é a vazão, pois reflete a resposta integrada de

uma série de processos hidrológicos que ocorrem em uma bacia (FEKETE et al., 2012) e porque observações estão prontamente disponíveis para muitas bacias em todo o globo (HANNAH et al., 2011).

Experimentos de campo em hidrologia são difíceis e caros devido às escalas espaciais, requisitos de instrumentação para medir uma ampla variedade de variáveis, especialmente na subsuperfície, e à heterogeneidade espacial dos estados e fluxos hidrológicos (FATICHI et al., 2016). Sendo assim, um dos principais desafios encontrados na modelagem é a falta de acesso a dados hidrológicos consistentes (BRESSIANI et al., 2015; PONTES et al., 2016), e mesmo quando estes existem podem apresentar representatividade e relevância limitadas (CLARK et al., 2017).

Como os modelos hidrológicos se baseiam principalmente em equações diferenciais parciais não-lineares com o objetivo de resolver grandes domínios em resoluções temporais e espaciais sutis, a sobrecarga computacional é outro grande problema enfrentado pelos modeladores. Os tempos de simulação aumentam à medida que mais processos são incluídos, as descrições dos processos se tornam mais gerais e as resoluções espaciais e temporais são aumentadas (FATICHI et al., 2016). Desta forma, se estruturas simples são capazes de destacar o surgimento de regras gerais que regem o comportamento de um sistema, elas são preferíveis a modelos complexos (FATICHI et al., 2016). No entanto, há muitos casos em que a representação da complexidade é necessária para compreensão de como os sistemas naturais funcionam e interagem.

As primeiras tentativas de modelagem hidrológica aconteceram a mais de 50 anos (LINSLEY e CRAWFORD, 1960; ROCKWOOD, 1964; FREEZE e HARLAN, 1969). Desde então, uma vasta gama de modelos hidrológicos conceituais, fisicamente baseados e estocásticos foram desenvolvidos, cada um com suas próprias suposições e características (SINGH, 1995; SINGH e FREVERT, 2002; ROSBJERG e MADSEN, 2006; TRAMBAUER et al., 2013; SOODA e SMAKHTIN, 2015; BIERKENS, 2016; KAUFFELDT et al., 2016).

3.1.1 Tipos de modelos

Cada modelo possui características específicas e é indicado para diferentes aplicações, não existindo um melhor modelo para todas as aplicações. Desta forma, o conhecimento sobre a classificação dos modelos hidrológicos ajuda a melhorar o entendimento das suas estruturas e de suas capacidades de uso (JAJARMIZADEH; HARUN; SALARPOUR, 2012).

Os modelos chuva-vazão podem ser classificados com base nos dados de entrada, nos parâmetros e na extensão em que os princípios físicos são aplicados, podendo ser empíricos, conceituais ou baseados fisicamente e se consideram ou não a variabilidade espacial, podendo ser distribuídos ou concentrados (DEVI; GANASRI; DWARAKISH, 2015).

3.1.1.1 Estruturas de modelos

Modelos empíricos apresentam menor complexidade e são também conhecidos como modelos caixa preta. Possuem relações não lineares entre suas entradas e saídas, sendo melhor aplicados em bacias não monitoradas onde a vazão é a única saída requerida. Muitos modelos utilizam equações empíricas, apesar de não serem classificados como tais, como é o caso do SWAT, que utiliza o método do número da curva no cálculo da geração de escoamento. As principais vantagens desse tipo de modelo são baixa quantidade de parâmetros necessária e baixo tempo de simulação (SITTERSON et al., 2017).

Modelos físicos, também conhecidos como modelos caixa branca, tentam representar os processos relevantes considerando os significados físicos de todo o processo no sistema hidrológico. São modelos complexos e válidos para uma ampla gama de aplicações, pois os processos físicos e a medição das características do sistema são a base para determinação dos seus comportamentos. Desta forma, não necessitam de muitos dados hidrológicos e meteorológicos para calibração, porém requerem grande quantidade de parâmetros para descreverem as características físicas da bacia durante suas aplicações, além de grande especialidade do modelador e capacidade computacional (DEVI; GANASRI; DWARAKISH, 2015; JAJARMIZADEH;

HARUN; SALARPOUR, 2012; KAUFFELDT et al., 2016; TRAMBAUER et al., 2013). Dentre os modelos físicos destacam-se o MIKE-SHE, VIC, SWAT e MGB.

Modelos conceituais, como por exemplo o HSPF (Hydrological Simulation Program-FORTRAN), TOPMODEL (Topography Based Hydrological Model) e HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning), utilizam equações simplificadas na representação do armazenamento de água e são baseados em reservatórios interconectados que representam os elementos físicos da bacia (DEVI; GANASRI; DWARAKISH, 2015; SITTERSON et al., 2017). São fáceis de calibrar e possuem estruturas simples, sendo indicados quando tempo computacional ou dados são limitados. O principal ponto negativo é a não consideração da variabilidade espacial dentro da bacia.

3.1.1.2 Estruturas espaciais

Modelos concentrados não consideram a variabilidade espacial da bacia. Toda a bacia é modelada como uma única unidade (DEVI; GANASRI; DWARAKISH, 2015). Desta forma, são modelos com rápido tempo computacional, sendo úteis na simulação de condições médias. Este tipo de modelo não é ideal para grandes áreas devido à grande quantidade de suposições e perda de resolução espacial (SITTERSON et al., 2017).

Modelos distribuídos, como o SWAT, MGB, MIKE-SHE e TOPMODEL, por outro lado, podem ser utilizados em qualquer escala, desde unidades experimentais até bacias inteiras. Segundo Pokhrel e Gupta (2011) e Smith et al. (2012), o benefício de modelos distribuídos reside, principalmente, na maior variedade de aplicações, incluindo cenários espaciais e fornecendo estimativas de variáveis hidrológicas no interior da bacia. Esses modelos tendem a ser baseados fisicamente. Beven (2001) ressalta que modelos distribuídos possuem problemas com não-linearidade, escala, singularidade e incertezas. Geralmente consomem muito tempo para configuração e necessitam de muitos recursos computacionais. Além disso, a obtenção dos resultados pode demandar muito tempo.

3.1.1.3 Aspectos envolvidos na escolha de modelos

Pesquisadores escolhem modelos considerando geralmente dois pontos de vista principais: ênfase nos processos ou nos resultados (MERRITT; LETCHER; JAKEMAN, 2003). Em 1995, Watson e Burnett formularam uma série de perguntas a serem consideradas na escolha de modelos (LEWARNE, 2009):

- O modelo é apropriado para a área de estudo e o problema investigado?

A escolha de uma estrutura de modelo adequada depende muito da função que o modelo precisa atender, como entender e responder perguntas específicas sobre o processo hidrológico; avaliar a frequência de eventos de escoamento; ou estimar a produção e disponibilidade de água para fins de manejo (VAZE et al, 2012). Identificar as prioridades da modelagem e as limitações de disponibilidade de dados, tempo e orçamento para modelagem ajudam a restringir as escolhas e garantir que o modelo seja o melhor para a finalidade pretendida (BEVEN, 2016; SITTERSON et al., 2017). Cada tipo de modelo serve a um propósito, e um tipo de modelo específico pode não ser categoricamente considerado mais apropriado do que outros em todas as situações.

Modelos excessivamente complicados, com grande número de parâmetros e processos considerados, correm o risco de apresentarem altos graus de incerteza associados com dados de entrada que são transferidos para as saídas dos modelos. Dependendo do objetivo da modelagem essas incertezas podem anular o benefício de uma representação mais realista dos processos (MERRITT; LETCHER; JAKEMAN, 2003). Desta forma é importante considerar a simplicidade do modelo em relação ao seu poder explicativo (STEEFEL e VAN CAPPELLAN, 1998).

É necessário considerar o equilíbrio entre os objetivos do trabalho de modelagem e a complexidade do modelo, qual variável e em qual escala espacial e temporal se gostaria de modelar e com qual exatidão. Capturar os processos que operam no sistema hidrológico muitas vezes não é suficiente para classificar o modelo escolhido como bom. O mesmo processo pode ser representado de várias maneiras, e não há como determinar qual é a forma correta (LEWARNE, 2009).

Thorsen et al. (2001) afirma que a capacidade preditiva de modelos empíricos e conceituais, no que diz respeito à avaliação dos impactos de práticas agrícolas

alternativas, é questionável, devido à sua natureza semi-empírica da descrição do processo. No entanto, outros autores argumentam que modelos conceituais simples, ou empíricos, quando usados dentro da estrutura desenvolvida, podem ser mais precisos do que modelos com estruturas mais complexas (FERRO e MINACAPILLI, 1995; LETCHER et al., 1999; SMITH et al., 2004).

A parametrização excessiva pode evitar que os modelos atinjam seu nível de desempenho potencial em sua capacidade de simular vazão. Modelos com um número maior de parâmetros geralmente fornecem melhor ajuste aos dados observados durante o período de calibração do que os mais simples, mas não necessariamente fornecem melhores previsões fora deste período, sugerindo que os modelos mais complexos estariam sujeitos a um sobreajuste (PERRIN et al., 2001). Modelos mais simples tendem a ser mais robustos, proporcionando performances mais estáveis do que modelos mais complicados (BEVEN, 2012).

A análise do desempenho de modelos, por meio da comparação entre as saídas calculadas e os dados observados, também auxilia na verificação de qual deles é mais indicado para um propósito específico. A primeira tarefa, neste sentido, seria determinar quais observações podem ser usadas para avaliação do desempenho de cada modelo, considerando o propósito para qual ele seria aplicado. Em seguida, escolher a metodologia a ser adotada na avaliação, considerando as particularidades das funções objetivo em relação ao modelo aplicado (BECK et al., 2017; MORIASI et al., 2012, 2015).

- Quais são os dados de entrada necessários?

Outro critério importante na seleção do modelo apropriado considera a disponibilidade de dados. Um equilíbrio entre os objetivos da pesquisa, a disponibilidade de dados e a complexidade do modelo torna a modelagem mais consistente e razoável. As incertezas não irão desaparecer e as fontes mais importantes devem ser consideradas de forma integrada, não apenas as incertezas dos parâmetros (KHERDE, 2016).

Além da disponibilidade e qualidade dos dados de entrada, deve-se atentar à maneira como o modelo lida com os dados não-existentes e como a informação é, espacial e temporalmente, distribuída na área e período de aplicação.

A precisão dos cálculos realizados por modelos depende da qualidade e da consistência dos dados de entrada e se esses descrevem adequadamente a realidade

da bacia hidrográfica. Porém, também é preciso levar em consideração também o objetivo da modelagem (GEZA; MCCRAY, 2008). Segundo Harmel et al. (2014), modelagens incluídas na categoria do tipo exploratório, em que os resultados do modelo serão usados para testes, desenvolvimento de modelos ou para comparações iniciais e aproximadas, confiança reduzida nas predições é aceitável. Os modeladores devem refletir sobre os benefícios na escolha da resolução da base de dados a ser utilizada, dependendo do tamanho da bacia e do nível de precisão requerido, uma vez que quanto maior for a resolução dos dados, mais esforço será necessário no processo de calibração (GEZA; MCCRAY, 2008).

Di Luzio et al. (2005) verificaram o efeito da qualidade dos dados nas simulações de vazão e sedimentos em uma pequena bacia e concluiu que a resolução do MDE é crítica na definição dos limites da bacia hidrográfica e das sub-bacias. Os autores concluíram que caso a resolução for muito baixa podem ocorrer problemas nas estimativas dos tamanhos das mesmas e dos valores do escoamento. Porém, problemas semelhantes em bacias de larga escala poderiam inexistir. A resolução dos mapas de uso e ocupação do solo influenciaram significativamente na previsão de escoamento, enquanto a resolução do mapa de tipos de solos apresentou influência limitada nos resultados da modelagem. Geza e McCray (2008) analisaram os efeitos da resolução dos mapas de tipos de solo na previsão de vazões e qualidade da água pelo modelo SWAT. Apesar da resolução dos dados não parecer ter causado grandes efeitos, pois tanto a consideração do mapa com baixa resolução quanto a do mapa com alta apresentaram resultados considerados bons, de acordo com valores de R2 e NSE calculados, o uso do mapa com maior resolução resultou em mais opções de calibração e demandou mais tempo nas simulações.

Sakka (2010) utilizou mapas de uso e tipo de solo com resoluções menores para aplicação dos modelos SWAT e WEAP em uma bacia de 1200 km²,localizada na Tunísia, visto que uma espacialização mais precisa e mais realista demandaria muito tempo. Lewarne (2009) mesclou os usos da bacia para que ficassem mais simples e utilizou um mapa de tipo de solo mais grosseiro, diminuindo o esforço com a variabilidade espacial e complexidade. Segundo Buarque (2015), a quantidade de classes e tipos e usos do solo no MGB deve resultar em custo computacional aceitável em termos de tempo de processamento. Os mapas podem apresentar diversas classes definidas por critérios que vão além da questão hidrológica, sendo necessário

classificá-las para um menor número. Na escala de aplicação do MGB, torna-se impraticável a distinção de solos que possam apresentar comportamentos semelhantes.

- Quais são os requisitos computacionais, facilidade de uso e suporte para o usuário?

A facilidade de uso da interface deve ser levada em consideração, uma vez que a entrada de dados pode demandar muito tempo do usuário. A facilidade e o esforço necessários para o preparo dos dados de entrada também devem ser considerados. A existência de comunidade de usuários local, bem como de documentação detalhada ajuda a reduzir o tempo necessário no preparo e aplicação do modelo, bem como a resolução de problemas (LEWARNE, 2009).

Os avanços computacionais em termos de hardware, software, maior velocidade e armazenamento, ferramentas de solução de erros e disponibilidade de softwares GIS avançados tornaram possível a simulação em grandes áreas. Porém, os requisitos computacionais devem ser considerados, pois podem ser fatores limitantes para sua aplicação (ARNOLD et al., 1998; KHERDE, 2016; BIERKENS, 2016; MERRITT; LETCHER; JAKEMAN, 2003).

- Quais as saídas requeridas?

Esta questão está relacionada principalmente com o objetivo da modelagem. As saídas requeridas pelo modelador devem estar disponíveis e na escala necessária. Alguns modelos analisam e interpretam os dados de saída, constroem gráficos e calculam parâmetros estatísticos, podendo auxiliar o modelador na análise dos resultados. As ferramentas de SIG utilizadas em conjunto com o modelo hidrológico facilitam o pré e o pós processamento gráfico (LEWARNE, 2009).

3.2 SWAT E MGB

Entre os modelos hidrológicos atualmente utilizados, SWAT, Sistema Hidrológico Europeu (SHE – BATHURST et al., 1995), Topography Based Hydrological Model (TOPMODEL – BEVEN e KIRKBY, 1979; BEVEN et al., 1995), Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB - COLLISCHONN, 2001), Variable Infiltration Capacity model

(VIC – LIANG e ZHENGHUI, 2001; LIANG et al., 1994), Hydrologiska Byrans Vattenavdelning model (HBV – BERGSTROM, 1976; LINDSTROM et al., 1997) destacam-se o SWAT e o MGB. Ambos são modelos hidrológicos distribuídos de chuva-vazão e utilizam o conceito de unidades de resposta hidrológicas (URH) para o cálculo do balanço hídrico e utilizam como base de entrada séries contínuas e dados espaciais e temporais. Além disso, ambos são gratuitos e foram aplicados em vários estudos ambientais no Brasil (BRESSIANI et al., 2015; BUARQUE, 2015; FUKUNAGA et al., 2015; MONTEIRO et al., 2016; PEREIRA, 2013; PONTES, 2016; SOUZA; SANTOS; KOBIYAMA, 2009).

3.2.1 SWAT

O SWAT é um sucessor do modelo SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins). É um modelo complexo, baseado fisicamente, considerado distribuído por alguns autores (PEREIRA et al., 2016a; MYLEVAGANAM, 2009; PISINARAS et al., 2010; ZHANG et al., 2015) e semi-distribuidos por outros (MONTEIRO et al., 2016; PFANNERSTILL; GUSE; FOHRER, 2014; ROMAGNOLI et al., 2017; ULLRICH; VOLK, 2009), contínuo e de escala de bacia que foi desenvolvido pelo Serviço de Pesquisa Agrícola do Estados Unidos (USDA-ARS) (ARNOLD et al, 1993). Em sua proposta inicial, o SWAT foi desenvolvido para operar em bacias não monitoradas, nas quais os esforços com calibração seriam mínimos ou até mesmo nulos, uma vez que as informações e a base de dados seriam suficientes para descrever os processos que ocorrem dentro da bacia e realizar simulações precisas (ARNOLD et al., 1998; NEITSCH et al., 2011).

A modelagem inicia-se com a divisão da bacia em sub-bacias e, posteriormente, a divisão destas em Unidades de Respostas Hidrológicas (URHs), áreas de comportamento hidrológico semelhantes formadas pela combinação dos mapas de uso e tipo de solo e declividade. A maioria das equações é aplicada em nível de URH, onde os processos físicos são descritos e resolvidos pelo modelo. A simulação pode ser compreendida em dois módulos: fase do terreno e fase de propagação na drenagem. A primeira controla a quantidade de água no canal principal de cada sub-bacia e a segunda a movimentação da água pela rede de canais da bacia hidrográfica até a descarga. Precipitação diária, temperatura máxima e mínima do ar, radiação

solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento são os dados de entrada utilizados pelo modelo para descrever a circulação da água e sedimentos, crescimento da vegetação e circulação de nutrientes (DEVI; GANASRI; DWARAKISH, 2015).

O SWAT é eficiente na simulação de um longo período de tempo, sendo utilizado para predizer o comportamento da bacia a longo prazo, porém requer grande quantidade de dados espaciais e não espaciais para descrição da heterogeneidade dos sistemas naturais. Os componentes do modelo são: hidrológico, clima, sedimentos, crescimento de plantas e nutrientes, pesticidas e manejo agrícola. A modelagem é feita com base na equação do balanço hídrico apresentado na Equação 1, tendo como volume de controle um perfil de solo de dois metros de espessura:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t} (R_v - Q_s - W_{seepage} - ET - Q_{gw}) \quad (1)$$

Em que SW_t é a quantidade final de água no solo (mm), SW_0 é a quantidade inicial de água no solo (mm), R_v precipitação total diária no dia 't' (mm), Q_s o escoamento superficial no dia 'i', $W_{seepage}$ é a quantidade de água que entra e é armazenada no solo no dia 'i', ET a evapotranspiração total diária no dia 'i' (mm), Q_{gw} é a vazão de retorno no dia 't' (mm) e t o tempo em dias.

Informações mais detalhadas a respeito dos processos do modelo podem ser obtidas em seu Manual (ARNOLD et al., 2012; NEITSCH et al., 2011).

3.2.1.1 Aplicações do SWAT

O SWAT vem sendo amplamente utilizado e aplicado em uma grande variedade de regiões do mundo com resultados considerados satisfatórios por diversos autores (BONUMÁ et al., 2014, 2015; PEREIRA et al., 2014; ZHANG et al., 2014; ABBASPOUR et al., 2015; BRESSIANI et al., 2015). Além disso, tem se mostrado uma ferramenta promissora na modelagem hidrológica até mesmo em bacias com pouca disponibilidade de dados de precipitação (ASHRAF VAGHEFI et al., 2013; BONUMÁ et al., 2013, 2015; RODRIGUES et al., 2014; BRESSIANI et al., 2015; MONTEIRO et al., 2015).

Abbaspour et al. (2015) construíram um modelo hidrológico para a Europa utilizando o modelo SWAT. O modelo foi calibrado para uma grande quantidade de estações fluviométricas bem como para parâmetros relacionados com qualidade da água. Este

trabalho, segundo os autores, mostrou que, com os avanços da tecnologia na construção de modelos e das ferramentas de calibração, e a grande disponibilidade de dados abertos, é possível construir um modelo continental com alta resolução temporal e espacial.

Sisay et al. (2017) avaliou a aplicabilidade do SWAT em uma bacia urbana apresentando área de drenagem 1.083 km², não monitorada, na Índia, por meio da simulação dos componentes do balanço hídrico. Os resultados mostraram, segundo os autores, boa correspondência entre os dados simulados e observados, demonstrando a possibilidade de bom desempenho do modelo em resoluções espaço-temporais maiores e em bacias urbanas não monitoradas.

Fukunaga et al. (2015) aplicaram o SWAT à parte superior da bacia do rio Itapemirim (2.237 km²), para o período de 1993 a 2000. Concluíram que o modelo pode ser considerado uma boa ferramenta na simulação de bacias tropicais com baixa disponibilidade de dados, especialmente meteorológicos. O modelo se mostrou sensível aos parâmetros relacionados ao fluxo subterrâneo. FUKUNAGA (2012) também aplicou o modelo à microbacia do córrego Jaqueira (22,6 ha). Porém, devido ao alto número de falhas e ao curto período de monitoramento hidrológico, a calibração e a verificação da aplicabilidade do modelo não foram possíveis.

Pereira et al. (2016a, 2016b) aplicaram o modelo à sub-bacia do Rio Pomba (8.600 km²), localizada em Minas Gerais. O modelo foi calibrado e validado e, segundo os autores, obteve boas estimativas dos componentes do balanço hídrico, bem como das vazões mínimas, médias e mensais, podendo contribuir para o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos da bacia.

3.2.2 MGB

O MGB é um modelo hidrológico que simula o comportamento físico dos processos que ocorrem na bacia de forma distribuída. É um modelo de grandes escalas baseado em processos que utilizam equações físicas e conceituais para simular, com espaço de tempo diário, ou horário, os processos hidrológicos na superfície terrestre. Os autores entendem como grandes bacias as regiões, geralmente maiores que 1.000 km², onde os processos de propagação fluvial e a diferença entre os divisores de água

superficial e subterrânea não podem ser negligenciados, e a chuva, o tipo e o uso de solo não podem ser considerados homogêneos (UFRGS-HGE, 2018).

A simulação de largas escalas é possível devido ao surgimento e avanços dos computadores em hardware, software, aumento de velocidade e armazenamento, ferramentas de depuração e disponibilidade de softwares GIS. Devido à grande escala, esses modelos enfrentam desafios de fornecerem resultados razoáveis, sendo computacionalmente eficientes, permitindo considerável detalhe espacial, requerendo insumos prontamente disponíveis e serem de tempo contínuo (KHERDE, 2016).

De forma a reduzir a intensidade computacional, o modelo MGB utiliza a abordagem do Agrupamento das Unidade de Resposta (GRU). Este agrupamento consiste em unir todas as áreas com uma combinação semelhante de solo e cobertura do solo, de modo que uma célula contenha um número limitado de GRUs distintas. O balanço de água do solo é calculado para cada GRU e o escoamento gerado a partir das diferentes GRUs na célula é então somado e encaminhado para a rede fluvial. Esta abordagem tem sido utilizada por vários modelos hidrológicos de larga escala, como o VIC (WOOD et al., 1992; LIANG et al., 1994; NIJSSEM et al., 1997) e o WATFLOOD (SOULIS et al., 2004).

O MGB vem sendo desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) ao longo dos últimos 10 anos. Desenvolvido por Collischonn (2001), com base nos modelos LARSIM e VIC-2L, como objetivo de representar o funcionamento hidrológico de uma bacia, transformação de chuva em escoamento e propagação de vazão ao longo dos rios. O modelo pode ser aplicado em simulações/testes, extensão de séries, mudanças climáticas, previsão de vazão, cheias de projeto, qualidade de água, produção e transporte de sedimentos e gestão e integração com Sistema de Apoio a Decisão (BUARQUE, 2015).

Os dados de relevo são utilizados para delimitar as mini-bacias (equivalentes às sub-bacias do SWAT) que são posteriormente divididas em blocos ou URHs, áreas com comportamentos hidrológicos semelhantes obtidas a partir da combinação de mapas de uso e tipo de solo. A simulação pode ser dividida em quatro módulos, sendo eles: balanço hídrico no solo; balanço de energia e evapotranspiração; interceptação, geração e propagação do escoamento nos elementos de discretização da bacia hidrográfica; e propagação de vazão na rede de drenagem. Maior detalhamento dos

processos calculados pelo modelo são apresentados em Collischonn (2001), Collischonn et al. (2007) e Pontes (2016).

Os dados de entrada necessários são precipitação, clima (temperatura, pressão, insolação, umidade relativa do ar, velocidade do vento), MDE, tipo de solo, uso do solo e vazão (para calibração). O modelo utiliza a Equação 2 para cálculo do balanço hídrico na bacia:

$$SW_{i,j}^{k} = SW_{i,j}^{k-1} + \left(P_i - ET_{i,j} - Q_{s_{i,j}} - Dint_{i,j} - Dbas_{i,j}\right) * \Delta t \qquad (2)$$

Em que $SW_{i,j}^{k}$ (mm) é a quantidade de água armazenada no solo no final do intervalo de tempo k, na URH j da mini-bacia i, $SW_{i,j}^{k-1}$ é a quantidade de água armazenada no solo no final do intervalo de tempo k-1, na URH j da mini-bacia i (mm), P_i ($mm*\Delta t^{-1}$) é a parcela da precipitação que atinge o solo, $ET_{i,j}$ ($mm*\Delta t^{-1}$) é a evapotranspiração a partir do solo, $Q_{s_{i,j}}$($mm*\Delta t^{-1}$) é o escoamento superficial, $Dbas_{i,j}$($mm*\Delta t^{-1}$) é a percolação ou recarga do aquífero e Δt, o incremento de tempo.

3.2.2.1 Aplicações do MGB

Muitos dos trabalhos publicados a respeito do MGB estão relacionados com aperfeiçoamentos, novos pacotes para diferentes softwares e inclusão de novos métodos de cálculo dos processos. Suas aplicações tem ocorrido principalmente em grandes bacias da América do Sul com diferentes características.

Tucci et al. (2003) utilizou o modelo MGB na previsão de vazão na bacia do rio Uruguai (75.000 km^2). Inicialmente, os dados de precipitação do modelo climático global do CPTEC subestimaram a precipitação em quase toda a bacia, principalmente para períodos de inverno. Após correção da sequência de precipitação, a previsão de vazão para a bacia foi melhor do que as previsões baseadas em vazões que utilizaram médias históricas ou vazões médias.

Fleischmann et al. (2018) aplicaram o modelo MGB à bacia do Alto rio Níger, na África, para o período entre 1999 a 2014 utilizando dados de precipitação diários TMPA 3B42 como dados forçantes juntamente com dados climatológicos CRU (Climate Research Unit) e dados in-situ e de sensoriamento remoto para calibração e validação. Segundo os autores, os resultados mostraram bom ajuste com os dados observados, com NSE maior que 0,6 para a maioria das estações.

Siqueira et al. (2016) desenvolveram o pacote IPH-Hydro Tools, um conjunto de ferramentas acoplado ao software livre MapWindow GIS, criado para facilitar a aquisição de informações topológicas em bacias hidrográficas, bem como realizar etapas de pré-processamento em modelos hidrológicos. O IPH-HydroTools foi comparado com outros pacotes e apresentou qualidade no traçado de redes de drenagem e menor tempo de processamento necessário para a delimitação de bacias, porém apresentando limitações quando matrizes muito grandes foram utilizadas e dificuldade na representação das redes de drenagem em áreas extensas.

Pontes et al. (2017) apresentaram um aperfeiçoamento para o modelo MGB, com a inclusão de um modelo inercial como método de propagação de vazão, substituindo o original baseado no método de Muskingum-Cunge. O método inercial obteve resultados melhores ou semelhantes aos obtidos com o método original. Porém, para bacias apresentando grandes declividades os resultados não foram melhores para todas as situações.

3.3 CICLO HIDROLÓGICO E EQUAÇÕES UTILIZADAS NO SWAT E NO MGB

O ciclo hidrológico, também conhecido como o ciclo da água, consiste no caminho que a água percorre na natureza à medida que se move em suas diferentes fases através da atmosfera, para baixo e através da terra, para o oceano e de volta à atmosfera (BRUTSAERT, 2005). Modelos hidrológicos são representações simplificadas deste ciclo e contribuem para a compreensão dos fenômenos que envolvem os parâmetros do ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica.

A estrutura dos modelos é baseada nas equações que os governam e são utilizadas no cálculo da vazão. A compilação das bases matemáticas dos modelos é útil na determinação de problemas, situações e condições nos quais cada um é mais aplicável/recomendado, as precisões e incertezas esperadas, seus potenciais de uso e limitações, e as direções para melhora e novos desenvolvimentos. A seguir, as metodologias de cálculo das principais etapas do ciclo hidrológico: precipitação, evapotranspiração, geração e propagação do escoamento, nos modelos SWAT e MGB, são apresentadas. Na tabela 1 são destacados em negrito os métodos utilizados na aplicação dos modelos SWAT e MGB no presente estudo.

Tabela 1 – Métodos utilizados pelo SWAT e MGB no cálculo das etapas de precipitação, evapotranspiração, geração e propagação de escoamento.

	SWAT	MGB
Precipitação	Dados associados a cada sub-bacia, considerando a estação pluviométrica mais próxima ao centroide da mesma.	Dados interpolados para cada minibacia considerando as estações inseridas.
Evapotranspiração	Três métodos disponíveis: **Pennan-Monteith**, Pristley-Taylor e Hargreaves.	Método de Pennan-Monteith
Escoamento superficial	Dois métodos disponíveis: **Número da Curva SCS** e Green Ampt.	Se dá apenas em áreas saturadas e segue processo Dunniano. A geração de escoamento utiliza a relação probabilística entre umidade do solo e fração de área saturada (Moore e Clarke 1981).
Propagação do escoamento	Dois métodos disponíveis: **Variable Storage** e Muskingun	Dois métodos disponíveis: **Muskingun Cunge** e Inercial

3.3.1 Precipitação

No SWAT os dados de precipitação estão associados a cada sub-bacia, sendo considerado apenas o posto pluviométrico mais próximo ao seu centroide. No caso da ausência de dados o modelo acessa o gerador climático - WGEN, que contém dados estatísticos sobre o clima previamente preparados pelo usuário.

No MGB os dados de precipitação são interpolados para cada minibacia utilizando o método do inverso da distância, sendo necessário que todos os dias tenham pelo menos uma estação apresentando dados. Ambos modelos disponibilizam programas auxiliares para o preparo dos dados de precipitação, pcpSTAT e Super Manejo, no SWAT e MGB, respectivamente.

3.3.2 Evapotranspiração

A medição direta da evapotranspiração é difícil, demorada e apresenta elevado custo. Desta forma os modelos disponibilizam equações para o seu cálculo, sendo elas as de Pennan-Montheith, de Hargreaves e de Pristley-Taylor, descritas a seguir.

O método de Pennan-Monteith é uma combinação de métodos e é o mais comumente utilizado (MIGLIACCIO e SRIVASTAVA, 2007) e universalmente preciso (WANG et al., 2009). É um método baseado fisicamente que incorpora parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos que podem ser utilizados sem grandes ajustes adicionais. Considerado o melhor método quando dados climáticos estão disponíveis (ALLEN et al 1998), o método de Penman-Monteith possui como dados de entrada radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. Sua principal vantagem é a apresentação de bons resultados para uma grande variedade de cenários climáticos (DROOGERS e ALLEN, 2002). Apresenta resultados mais próximos dos resultados das medições com lisímetros do que outros métodos (JENSEN et al., 1990; ALLEN et al., 1998; VENTURA et al., 1999; PEREIRA e PRUITT, 2004; GAVILÁN et al., 2006; LOPEZ-URREA et al., 2006; BENLI et al., 2010). Sua desvantagem é que, com exceção dos dados de temperatura, os demais geralmente não estão disponíveis.

O método de Hargreaves é empírico, baseado na temperatura. Seus dados de entrada são temperaturas do ar máxima e mínima. Estes dados estão disponíveis para muitas estações meteorológicas (DROOGERS e ALLEN 2002). O método apresenta bons resultados de estimação (JENSEN et al., 1990), porém superestima a evapotranspiração em climas úmidos e subestima em regiões muito secas (JENSEN et al., 1990; AMATYA, 1995; DROOGERS e ALLEN, 2002).

O método de Pristley-Taylor é empírico e baseado na radiação solar. Possui um melhor desempenho em superfícies molhadas ou úmidas (AMATYA et al., 1995; LU et al., 2005) e tende a subestimar a evapotranspiração em regiões áridas ou semiáridas.

Ngongondo et al. (2013) comparou os diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração e concluiu que a falta de dados de velocidade do vento e pressão de vapor não afetou significantemente o método Penman-Monteith e, por outro lado, os métodos Hargreaves e Pristley-Taylor subestimaram a evapotranspiração e precisaram ser calibrados localmente. Kilonzo et al. (2011) concluiu que a escolha do método para cálculo da evapotranspiração não influenciou significantemente no escoamento, sendo que o método Penman-Monteith aplicado com dados de CRU (Climatic Research Unit) trouxeram melhores resultados do que quando utilizado dados CFSR (Climate Forecast System Reanalysis). Em regiões áridas o método

Penman-Monteith resultou em baixos valores de evapotranspiração, apresentando alta sensibilidade a dados de entrada imprecisos.

A equação de Penman-Monteith geralmente é a escolha padrão de muitos modeladores (HARGREAVES et al., 2003; DROOGERS e ALLEN, 2002; GAVILAN et al., 2006). Por ser baseada fisicamente, é preferida a outras equações mais simples e empíricas (KAY e DAVIES, 2008; KINGSTON et al., 2009). Além disto, foi testada em diversas regiões e climas diferentes, trazendo resultados bons e compatíveis com aqueles obtidos por meio da medição direta com lisímetros. Porém, esta equação requer uma grande quantidade dados de entrada que normalmente não estão disponíveis em estações meteorológicas. Neste cenário, as equações empíricas de Pristley-Taylor e Hargreaves podem ser indicadas. No presente estudo, considerando que os dados de entrada necessários estavam disponíveis, foi utilizada a equação de Penman-Monteith em ambos os modelos, SWAT e MGB.

3.3.3 Escoamento superficial

Os métodos disponíveis para estimativa do escoamento superficial nos modelos são o SCS-CN e Green-Ampt no SWAT, e o Dunniano no MGB. O SCS-CN é um método empírico, resultado de mais de 20 anos de estudo envolvendo relações precipitação-escoamento em pequenas bacias hidrográficas rurais no EUA. O modelo estima as quantidades de escoamento para diferentes usos da terra e tipos de solo. É simples, previsível e estável, sendo utilizado principalmente em áreas que não possuem elevadas quantidades de dados hidrológicos. É baseado no princípio do excesso de infiltração (escoamento superficial de Horton), pelo qual o escoamento ocorre quando a taxa de precipitação excede a capacidade de infiltração da superfície do solo. Suas principais limitações são a dificuldade na atribuição de valores de CN e a não consideração de eventos de pico de chuva ou da duração dos eventos. Desta forma, não é possível representar a taxa de escoamento, caminhos e áreas de contribuição. O propósito inicial do método seria computar o volume de fluxo (menos o fluxo de base) para uma enchente. Porém, o resultado final pode incluir também o escoamento lateral. Assim, sua utilização apenas para o escoamento superficial pode resultar em superestimativa deste escoamento (GAREN e MOORE 2005).

O método de Green & Ampt é baseado fisicamente e assume que o perfil do solo é homogêneo e a umidade inicial é uniformemente distribuída no perfil do solo. Assim como o método SCS-CN, também é baseado no princípio do excesso de infiltração (escoamento superficial de Horton). Os métodos baseados fisicamente e em Horton requerem uma grande quantidade de parâmetros, o que torna difícil alcançar uma estimativa confiável para a escala de bacia. Este método necessita de dados de precipitação em intervalos de tempo menores que um dia. Além disso, considera o parâmetro 'condutividade hidráulica do solo saturado' que pode apresentar grande variabilidade espacial sobre pequenas áreas.

O método Dunniano é menos dependente das características da chuva e mais dependente da topografia e de características do solo (WINCHELL, GUPTA e SOROOSHIAN, 2018). É baseado no excesso de saturação, que ocorre quando a zona insaturada fica saturada e o solo não permite infiltração. A precipitação ocorre em áreas de contribuição variáveis que expandem ou contraem durante a enchente e ciclos entre-enchentes. Desta forma, considera que apenas uma parte da bacia contribui para o escoamento superficial, ou seja, áreas de contribuição variáveis. Esse tipo de geração de escoamento é típico de regiões úmidas.

Devido à necessidade de dados de precipitação para intervalos de tempo menores que um dia para emprego do método Green-Ampt, optou-se, no presente estudo, por utilizar o método SCS-CN no SWAT.

3.3.4 Propagação da vazão

No SWAT, a fase de propagação simula evaporação e perdas na transmissão do canal, desvios de água e adição de água através de fontes pontuais. No MGB, a propagação de vazão no interior de cada minibacia é realizada de forma simplificada utilizando reservatórios lineares simples, representando separadamente os escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo.

Os métodos utilizados para propagação do escoamento no SWAT são o de Muskingun e do Armazenamento Variável, ambos baseados no modelo da onda cinemática e na equação da continuidade, sendo que Muskingun é baseado na equação empírica do armazenamento linear. O método de Muskingun tende a superestimar a evaporação diária do canal e subestimar as perdas diárias de transmissão (NGUYEN et al., 2018).

Porém, Nguyen et al. (2018) verificou que uma sub-rotina corrigida no SWAT2012 (Revisão 664) mostrou boa estimativa da onda de inundação no período simulado. O método de Muskingun possui algumas desvantagens, como o fato de grande parte do volume de escoamento, se não todo, em períodos de vazões baixas, poder ser perdido devido à superestimação de evaporação em canais. (NGUYEN et al., 2018).

O método do Armazenamento Variável (WILLIAMS, 1969) possui como principais fontes de informação comprimento, inclinação e valor do coeficiente de Manning para os canais, que podem ser obtidos através do MDE e das propriedades do solo. A vazão e a velocidade média são calculadas usando a equação de Manning e o tempo de percurso é calculado dividindo o comprimento do canal pela velocidade. O fluxo de saída de um canal é ajustado para perdas de transmissão, evaporação, desvios e fluxo de retorno. Nguyen et al. (2018) ressalta como desvantagens deste método a obtenção de resultados não físicos e que o SWAT 2012 não transforma o hidrograma de vazão, sendo o volume de escoamento simplesmente atribuído como o volume de água no curso d'água no início de um dia, isto é, o volume de influxo.

No MGB os métodos disponíveis são os de Muskingung-Cunge e Inercial. O primeiro é uma modificação do método de Muskingun, em que Cunge baseou-se nas equações de Saint-Venant, adotando as simplificações do modelo de onda cinemática. Este método é inadequado quando o rio tem efeito de jusante ou possui planície inundável. Nesses casos a onda de cheia calculada chegará adiantada e os picos simulados serão exagerados. O método Inercial é uma aproximação das equações de Saint-Venant, que despreza apenas o termo de inércia advectiva na equação dinâmica. Comumente aplicado em rios de baixa declividade, em rios com trechos de reservatório, e naqueles sujeitos a efeitos de maré, apresenta resultados semelhantes aos modelos que utilizam Saint-Venant, porém com algoritmo e código computacional muito mais simples. A simulação com o método Inercial é cerca de 10 vezes mais lenta do que quando é utilizado o método de propagação Muskingum-Cunge (PONTES et al., 2015) .

Kim e Lee (2010) sugeriram a implementação de uma equação de armazenamento não-linear obtida pelo acoplamento das equações de continuidade e de Manning, para evitar a subestimação dos fluxos de pico e sinais falsos durante o período de recessão quando o método de Muskingum é usado no SWAT. O modelo SWAT simplifica a propagação de vazões. Desta forma, os efeitos de remanso e das planícies de

inundação no retardo e amortecimento dos hidrogramas não são bem representados, o que pode prejudicar sua aplicação nas bacias de larga escala nas quais esses processos controlam o regime de vazões (BUARQUE, 2015).

No presente estudo, o método Armazenamento Variável foi utilizado na simulação do SWAT, enquanto que Muskingum-Cunge foi usado no MGB.

3.4 COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS

Modelos distribuídos de bacias hidrográficas têm sido usados cada vez mais para implementação de estratégias alternativas de gestão nas áreas de alocação de recursos hídricos, controle de enchentes, uso do solo e mudanças climáticas, bem como controle de poluição. Porém, ainda não é claro, na literatura, qual modelo, ou abordagem, é o mais indicado em cada situação. Desta forma, estudos de intercomparação ganham interesse crescente. Além disso, há demanda predominante de orientação para qual modelo com qual grau de complexidade escolher para uma determinada aplicação (BEVEN, 2016; KHERDE, 2016; LI; XU; BELDRING, 2015; MENDOZA et al., 2015).

É necessário explorar sistematicamente e de forma abrangente os benefícios das diferentes abordagens de modelagem. A avaliação sistemática dos ganhos e perdas de informação usando modelos de diferentes níveis de complexidade, explorando a interação entre mudanças na complexidade do processo e mudanças na complexidade espacial, auxiliam na identificação de configurações de modelos úteis para aplicações específicas (CLARK et al., 2017).

Refsgaard e Knudsen (1996) aplicaram a metodologia de Klemes (1986) na validação de três modelos hidrológicos: NAM, modelo concentrado e conceitual; MIKE SHE, modelo distribuído e baseado fisicamente; e WATBAL, modelo intermediário. Segundo os autores, todos os modelos apresentaram desempenhos igualmente bons quando pelo menos um ano de dados estava disponível para calibração, sendo que os modelos distribuídos apresentaram desempenhos marginalmente melhores para casos nos quais nenhuma calibração foi realizada.

Liew, Arnold e Garbrecht (2003) compararam o desempenho dos modelos SWAT e HSPF (Hydrologic Simulation Program-Fortran) aplicados a oito bacias hidrográficas agrícolas dentro da Bacia Experimental do Rio Little Washita (LWREW) e duas bacias

hidrográficas agrícolas adjacentes, dentro da Bacia do Rio Washita, no sudoeste de Oklahoma (EUA). O HSPF obteve melhores resultados nas bacias utilizadas para calibração, enquanto o SWAT nas bacias utilizadas para validação. A diferença de desempenho dos modelos foi atribuída aos seus diferentes mecanismos de produção de escoamento. Foi concluído que o SWAT se mostrou mais adequado na investigação de impactos de longo prazo da variação climática em águas superficiais, uma vez que seus resultados foram mais robustos e consistentes.

Em 2004, o Laboratório de Hidrologia do Serviço Nacional de Clima (NWS) do Estados Unidos propôs a criação do Projeto de Intercomparação de Modelos Distribuídos (DMIP) com objetivo de convidar a comunidade acadêmica e pesquisadores a oferecerem suporte à NWS em pesquisas relacionadas com a comparação de modelos distribuídos aplicados a um conjunto de dados, bem como abordarem questões não resolvidas sobre a variabilidade das chuvas e seus efeitos sobre as respostas das bacias (SMITH ET AL., 2004). Diversos modelos foram comparados considerando dados de precipitação horária e resolução espacial 4 km. Oito bacias, com áreas variando entre 65 e 2.484 km² foram selecionadas para os estudos comparativos. Seus resultados mostraram que, em geral, os modelos concentrados obtiveram melhores desempenhos do que modelos distribuídos e que os resultados dependiam da forma da bacia e das características do solo e climáticas (BUTTS et al., 2004; REED et al., 2004).

Srivastava, Mc Nair e Johnson (2006) compararam os modelos SWAT e Redes Neurais Artificiais na simulação hidrológica em uma bacia agrícola. Os métodos de avaliação de desempenho, NSE e R2 sugeriram que as previsões mensais realizadas pela rede neural se aproximaram mais dos valores observados, quando comparadas com os resultados do SWAT. Os autores afirmaram que, apesar deste e outros estudos utilizando Redes Neurais Artificiais sugerirem que estes modelos representam alternativas viáveis para a modelagem hidrológica e de qualidade de água, estes, na sua forma atual não são sistemas de modelagem de bacias espacialmente distribuídas. Contudo, considerando o promissor desempenho do modelo Redes Neurais Artificiais, os mesmos autores sugerem que esta abordagem garante avanços para explicitação da distribuição dos processos hidrológicos e de qualidade de água no interior de bacias hidrográficas.

Sakka (2010) avaliou a aplicabilidade dos modelos baseados fisicamente e espacialmente distribuídos SWAT e WEAP (Water Evaluation And Planning) na simulação de processos hidrológicos em ambientes áridos. Os modelos foram aplicados em uma bacia de 1.200 km², na Tunisia. Os resultados obtidos pelo SWAT foram considerados aceitáveis, considerando o NSE igual a 0,64, calculado na calibração da vazão, superior ao valor 0,41, calculado para o WEAP.

Cornelissen, Diekkruger e Giertz (2013) compararam quatro modelos hidrológicos, WaSiM, SWAT, UHP-HRU e GRaJ, com objetivo de avaliar o impacto do uso da terra e de mudanças climáticas na vazão de uma bacia tropical apresentando área de drenagem 2.344 km². O modelo conceitual semi-distribuído, UHP-HRU, foi considerado o mais adequado para a simulação da vazão, uma vez que os componentes do escoamento simulado se aproximam mais dos processos hidrológicos obtidos em análises de campo. Além disso, como as demandas de dados não eram elevadas, este modelo não introduziu novas incertezas na simulação. A aplicação de cenários de mudança climática resultou em uma variação considerável nos resultados das modelagens. Os autores afirmam que o estudo indicou que a maior fraqueza de todos os modelos hidrológicos avaliados correspondeu à não representação adequada das características do solo e dos processos de fluxo da bacia.

Vansteenkiste et al. (2013) comparou dois modelos hidrológicos espacialmente distribuídos, MIKE SHE e WetSpa, nas estimativas dos impactos das mudanças climáticas nos regimes de fluxo em uma bacia hidrográfica de tamanho médio, localizada na Bélgica. Foi concluído que ambos modelos conseguiram capturar a dinâmica dos fluxos com alta eficiência e apresentaram boas simulações de vazões máximas. Vansteenkiste et al. (2014) aplicou cinco modelos hidrológicos: NAM, PDM e VHM, modelos concentrados e conceituais e WetSpa e MIKE SHE, modelos distribuídos. Os modelos apresentaram diferentes resoluções espaciais e descrições dos processos calculados. Eles foram aplicados à mesma bacia localizada na Bélgica, com objetivo de avaliar as precisões e as diferenças entre valores de variáveis simuladas, incluindo vazões de pico e de recessão. Segundo os autores, após calibração, todos os modelos testados obtiveram altos desempenhos nas simulações do escoamento total, sendo que a calibração de modelos concentrados se mostrou muito menos demorada. Foi concluído ainda que os modelos concentrados

considerados apresentaram melhores desempenhos do que os modelos distribuídos, mais complexos.

Golmohammadi et al. (2014) avaliou o desempenho de modelos que utilizam SIG: MIKE-SHE, APEX e SWAT, na simulação hidrológica diária de uma pequena bacia hidrográfica localizada no Canadá. Os três modelos foram calibrados em um período de quatro anos e validados em um período independente, também de quatro anos. Os resultados simulados foram comparados com os dados observados de vazões diárias, mensais e anuais. Os autores observaram que as vazões simuladas pelos modelos foram similares e apresentaram boas correspondências com as vazões observadas, principalmente no período de calibração, sendo que as vazões médias diárias e mensais calculadas pelo modelo MIKE-SHE apresentaram as melhores simulações para os períodos de calibração e validação.

Tegegne, Park e Kim (2017) aplicaram diferentes modelos em uma bacia de 15.114 km², na Etiópia, com finalidade de avaliação das previsões diárias de vazões em um ambiente com dados limitados. Dois modelos simples e conceituais (GR4J e IHACRES) foram comparados com um modelo complexo semi-distribuído e baseado fisicamente (SWAT). Os modelos conceituais simples obtiveram melhores resultados nas bacias menores na reprodução das vazões observadas ao longo do tempo, enquanto o SWAT, modelo mais complexo, obteve melhor desempenho na bacia maior e mais complexa. Os autores indicaram, a partir dos resultados, que modelos distribuídos são especialmente aplicáveis em bacias complexas devido às suas heterogeneidades físicas. Os modelos conceituais foram mais facilmente configurados e calibrados nas quatro bacias selecionadas, enquanto que o tempo de configuração e os esforços requeridos para o uso do SWAT foram altos se comparados com os correspondentes aos dois modelos conceituais simples.

3.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade é a etapa que antecede a calibração do modelo. Ela é empregada para melhorar a sua eficiência (KHORASHADI ZADEH et al., 2015). O conhecimento da sensibilidade do modelo às variações dos parâmetros de entrada é benéfico para o seu desenvolvimento e aplicação, pois parâmetros representam processos e a análise de sensibilidade fornece informação a respeito dos processos

mais importantes na região de estudo. Além disso, ajuda a reduzir a quantidade de parâmetros a serem utilizados na calibração, eliminando aqueles identificados como não sensíveis (ABBASPOUR; VAGHEFI; SRINIVASAN, 2017).

O julgamento da significância dos parâmetros deve ser feita com base nos conhecimentos prévios do usuário, conhecimento do processo analisado e dados na literatura existente. A análise de sensibilidade tem por objetivo identificar até que ponto as variações na saída de um modelo podem ser atribuídas a variações nos parâmetros de entrada. A análise de sensibilidade pode ser local ou global. A local é simples e rápida, sendo os valores dos parâmetros alterados um a um. Porém, não é possível prever se os valores dos parâmetros fixados são corretos. Na análise global, todos os parâmetros podem mudar, sendo necessárias muitas simulações; a sua principal vantagem está em produzir resultados mais confiáveis (ABBASPOUR; VAGHEFI; SRINIVASAN, 2017).

3.6 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

A calibração do modelo é o procedimento pelo qual a diferença entre a simulação e a observação é minimizada. Através desse processo, é esperado que o modelo simule corretamente os processos do sistema físico. A calibração do modelo é um processo desafiador e rigoroso, que depende do número de parâmetros de entrada, complexidade do modelo e quantidade de iterações (VANROLLEGHEM et al., 2003 e ABBASPOUR et al, 2015). A validação é utilizada para verificar a confiança nos parâmetros calibrados. Para este propósito, os intervalos de parâmetros são aplicados a um conjunto de dados medidos independentemente, sem que outras alterações sejam realizadas.

Apesar da grande importância da calibração e da validação de modelos, segundo análise de 102 estudos envolvendo o modelo SWAT, no Brasil, realizados entre 1999 a 2015, apenas 66% apresentaram resultados de calibração e 23% resultados de validação. Na grande maioria dos estudos, períodos curtos (menores que 5 anos) foram utilizados para essas etapas, o que indica uma grande dificuldade na obtenção de dados em várias sub-regiões no Brasil (BRESSIANI et al., 2015).

Existem diversas maneiras de calibração de modelos hidrológicos. O método de tentativa e erro manual usa dados históricos observados para ajuste de cada

parâmetro do modelo, e os parâmetros são então comparados visualmente para determinar se outra tentativa deve ser executada (SINGH, 1995). Porém, a calibração manual é demorada e a experiência do modelador é essencial para obtenção de uma boa calibração. Outra dificuldade é saber quando o “melhor” ajuste foi obtido (SINGH, 1995). Algoritmos de otimização automática são projetados para aceleração do processo de calibração. Esses algoritmos calibram os modelos chuva-vazão rapidamente, adotando intervalos de confiança para minimização de diferenças entre dados modelados e observados.

Bashar (2005) concluiu que modelos simples envolvendo menos parâmetros previam vazões na Bacia do Rio Nilo melhor do que modelos usando mais parâmetros e computações matemáticas complexas. Embora modelos simples com poucos parâmetros possam ter melhor desempenho e menor tempo de calibração, eles também podem comprometer as características físicas. Melsen et al. (2016) concluíram que o desempenho de modelos é limitado principalmente pelas suas estruturas e não por seus parâmetros.

A calibração é essencial para obtenção de dados de vazões simuladas mais confiáveis (SITTERSON et al., 2017). Quando o número de parâmetros usados na calibração é grande, especialmente para modelos hidrológicos complexos, a calibração manual pode se tornar trabalhosa. Neste caso, os métodos de calibração automatizados são preferíveis (ARNOLD et al., 2012) .

Dentre os métodos de calibração, destaca-se o desenvolvido por Klemeš (1986). Sua aplicação é a mais exigente encontrada na literatura (ANDRÉASSIAN et al., 2009). Ele propõe um procedimento hierárquico de calibração/validação dos modelos, composto de testes que seguem uma ordem crescente de complexidade: Split Sample test, Proxy basin test, Differential Split Sample test e Differential Proxy basin test. Pereira (2013) utilizou o Split sample test na avaliação do modelo SWAT para a simulação de processos estacionários em bacias hidrográficas com monitoramento hidrológico e o Proxy basin test para geração de series históricas em bacias sem monitoramento hidrológico. Daggupati et al. (2015) capturaram a variação espacial da bacia utilizando a calibração espacial Proxy-basin. Brighenti, Bonumá e Chaffe (2016) testaram a metodologia proposta por Klemes (1986) para o uso do modelo SWAT e realizaram um estudo de caso na bacia hidrográfica do Rio Negrinho (SC), avaliando a eficiência do modelo com o uso dessa metodologia de calibração.

Segundo Bressiani et al., (2015) e Monteiro et al., (2015), obter dados hidrometeorológicos no Brasil ainda é um grande desafio, o que faz com que as incertezas envolvidas nos processos de modelagem aumentem, especialmente durante a calibração e a validação (PONTES et al., 2016). Desta forma, métodos de avaliação de incertezas e sensibilidade dos parâmetros são necessários (ZHANG et al., 2014).

3.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Estudos envolvendo modelagem de bacias hidrográficas costumam utilizar técnicas estatísticas para avaliação do desempenho dos modelos utilizados. Esta avaliação tem como objetivo fornecer estimativa quantitativa da capacidade do modelo de reproduzir o comportamento histórico da bacia hidrográfica, além de fornecer um meio para avaliação de melhorias na abordagem da modelagem (KRAUSE; BOYLE; BÄSE, 2005).

Geralmente, a saída do modelo é comparada com os dados medidos correspondentes, com a suposição de que estes estão livres de erros e que toda a variação do erro está contida nos valores calculados. Porém, Moriasi et al. (2007) lembra que estimativas de incerteza para a vazão medida devem ser consideradas ao calibrar, validar e avaliar modelos de bacias hidrográficas por causa de diferenças na incerteza inerente aos dados observados.

Segundo Kherde (2016), a comparação dos valores de vazões obtidos por modelos geralmente é realizada de maneira qualitativa por meio de gráficos. Sendo a intenção do modelador determinar a aplicabilidade de dois métodos diferentes de modelagem, gráfico mostrando as diferenças entre os resultados correspondentes a cada modelo comparados com os dados observados é preferível. Plotagem de gráficos com curvas de permanência é uma opção para comparação de resultados de modelagem com dados observados, uma vez que elas permitem ao modelador a comparação de todos os dados do intervalo de resultados e observação visual.

Embora a comparação visual dos resultados possa fornecer uma avaliação geral sobre o desempenho dos modelos, o modelador deve sempre prestar atenção aos valores dos indicadores estatísticos. A eficiência de Nash-Sutcliffe tem sido amplamente utilizada por pesquisadores como uma função objetivo para avaliar o

desempenho de um modelo, uma vez que é recomendado pela ASCE (1993). Quando o objetivo é a comparação entre dois ou mais modelos, indicadores como o erro médio quadrático (RMSE) e percentagem bias (PBIAS) também são recomendados (KHERDE, 2016).

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) (NASH; SUTCLIFFE, 1970) (Equação 3): verifica o ajuste dos picos e a dinâmica da vazão, varia de -∞ até 1, sendo que NSE igual a 1 corresponde a uma simulação perfeita, e NSE negativo demonstra uma simulação inadequada, em que a média dos dados observados é um preditor melhor do que a saída do modelo. Valores de NSE entre 0,0 e 1,0 são geralmente aceitáveis. O NSE é sensível a valores extremos (KRAUSE; BOYLE; BÄSE, 2005). Valores maiores presentes em séries temporais são superestimados, enquanto valores mais baixos são negligenciados (LEGATES e MCCABE, 1999). Apesar disso, Sevat e Dezetter (1991) consideram o NSE a melhor função objetiva para refletir o ajuste geral de um hidrogramas.

$$\mathrm{NSE} = 1 - \frac{\sum (Q_t^{obs} - Q_t^{calc})^2}{\sum (Q_t^{obs} - \overline{Q_t^{obs}})^2} \qquad (3)$$

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe para os logaritmos das vazões (NSlog) (Equação 4) é semelhante ao NSE. O NSElog também tem valor máximo igual a 1, sendo influenciado principalmente por erros nas vazões mínimas. Normalmente, valores de NSElog próximos da unidade significam que o modelo está simulando adequadamente os períodos de recessão do hidrograma e estiagens (KRAUSE; BOYLE; BÄSE, 2005).

$$\mathrm{NSE}_{\log} = 1 - \frac{\sum (\ln(Q_t^{obs}) - \ln(Q_t^{calc}))^2}{\sum (\ln(Q_t^{obs}) - \ln(\overline{Q_t^{obs}}))^2} \qquad (4)$$

A Percentagem bias (Pbias) (Equação 5): avalia a tendência média das vazões simuladas serem maiores ou menores que as observadas, sendo o valor ótimo igual a zero. Valores positivos ou negativos significam super ou subestimativas, respectivamente. Os valores de Pbias para vazões tendem a variar mais, para

diferentes métodos de autocalibração, durante anos secos do que durante anos úmidos (GUPTA et al., 1999).

$$\text{Pbias} = \frac{\sum (Q_t^{obs} - Q_t^{calc})}{\sum Q_t^{obs}} * 100 \quad (5)$$

Critérios de avaliação de desempenho auxiliam os usuários de modelos e tomadores de decisão a estimar a exatidão da calibração e validação do modelo, a usabilidade para sua aplicação específica e a incerteza ou confiabilidade das previsões do modelo (DUDA et al., 2012 e MORIASI, 2015). A Tabela 2 apresenta a relação de valores classificados como muito bom, bom, satisfatório e insatisfatório utilizado na calibração e validação de modelos hidrológicos, segundo proposto por Moriasi et al. (2015).

Tabela 2 – Critérios de avaliação de desempenho final para medidas estatísticas em modelos de bacias hidrográficas

Classificação	R2	NSE	Pbias (%)
Muito boa	$R^2 > 0,85$	NSE > 0,80	Pbias < ± 5
Boa	$0,75 < R^2 \leq 0,85$	0,70 < NSE ≤ 0,80	± 5 ≤ Pbias < ±10
Satisfatória	$0,60 < R^2 \leq 0,75$	0,50 < NSE ≤ 0,70	± 10 ≤ Pbias < ± 15
Insatisfatória	$R^2 \leq 0,60$	NSE ≤ 0,50	Pbias ≥ ± 15

Fonte: Adaptado de Moriasi et al. (2015)

Outros autores (WU e CHEN, 2009, OLIVEIRA, 2014 e FERRIGO, 2014) consideram satisfatórios valores de NSE ≥ 0,4, quando um passo de tempo diário na simulação e análise dos modelos é utilizado, sendo menos exigentes do que Moriasi et al. (2015). O Erro quadrático médio (RMSE) (Equação 6) é representativo da magnitude do erro típico. É medido na mesma unidade da saída de interesse e varia de 0 a ∞, sendo o valor ótimo igual a zero. Tende a dar maior peso a valores mais altos, pois erros com valores altos são maiores em valores absolutos que erros em valores baixos. Desta forma, Moriasi et al. (2007) recomendam que o RMSE seja normalizado utilizando o desvio padrão das observações. Singh et al. (2004) afirmaram que valores de RMSE inferiores à metade do desvio padrão dos dados observados podem ser considerados baixos e indicativos de um bom modelo de previsão.

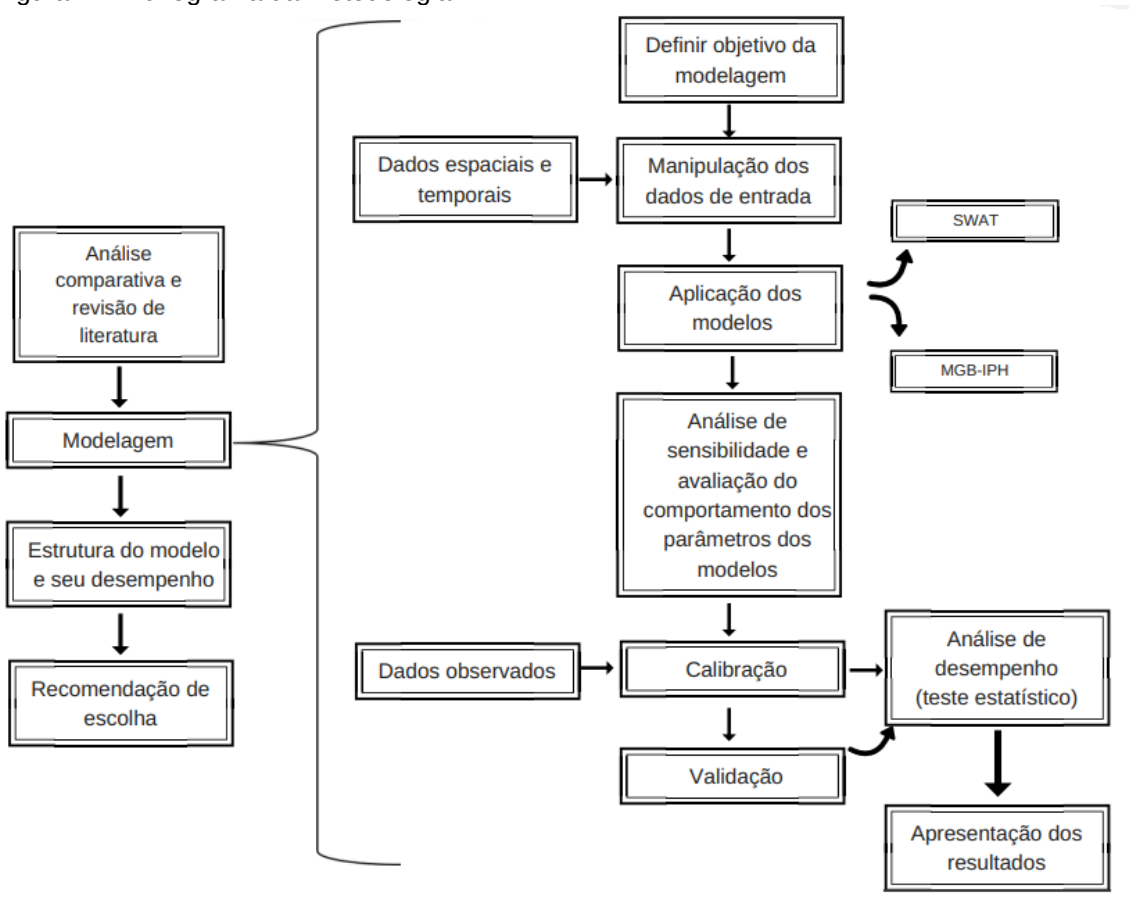
$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (Q_t^{obs} - Q_t^{calc})^2}{N}} \quad (6)$$

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS

A Figura 1 apresenta uma visão geral da metodologia utilizada no desenvolvimento do presente trabalho.

Figura 1 – Fluxograma da metodologia



Primeiramente foram levantadas informações na literatura sobre os modelos SWAT e MGB como os aspectos gerais de suas aplicações, equações utilizadas, base de dados necessária, processos modelados, entre outras. Para a modelagem, dados de entrada foram selecionados e manipulados para que estivessem de acordo com os formatos requeridos.

Os modelos MGB e SWAT foram aplicados de acordo com os respectivos manuais (JARDIM et al., 2017; WINCHELL et al., 2013), sendo calibrados e validados para os parâmetros cujas variações causaram maior sensibilidade nos modelos.

Características e desempenhos dos modelos foram analisados considerando estruturas, equações, parâmetros utilizados e vazões simuladas.
A partir dos resultados das análises foram propostas recomendações relacionadas com a escolha de modelos, considerando fatores como preparo de bases de informações, facilidade de introdução de dados, facilidade de calibração, desempenhos nos cálculos das vazões, comunidades de usuários, dentre outros.

4.2 ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Itapemirim está localizada no sul do Espírito Santo e é considerada uma das mais importantes do estado. Com área de drenagem de aproximadamente 6.000 km², ocupa 13% do Espirito Santo, abrangendo os municípios de Alegre, Atílio Vivacqua, Cachoeiro de Itapemirim, Castelo, Conceição de Castelo, Ibitirama, Jerônimo Monteiro, Muniz Freire e Venda Nova do Imigrante em suas totalidades e, parcialmente, os municípios de Ibatiba, Iúna, Irupi, Itapemirim, Marataízes, Muqui, Presidente Kennedy e Vargem Alta; além de uma pequena parte do município mineiro de Lajinha (AGERH, 2018). A bacia está geograficamente situada entre os meridianos 40º48' e 41º52' de longitude a oeste, e entre os paralelos 20º10' e 21º15' de latitude a sul. É delimitada ao norte com as bacias dos rios Novo, Jucu e Doce; ao sul, com a bacia do rio Itabapoana; à noroeste com o Estado de Minas Gerais; e ao leste, com o Oceano Atlântico.
O rio Itapemirim possui importância estratégica para o desenvolvimento do sul do estado. A economia da região é baseada na agropecuária, contando também com a extração e o beneficiamento de rochas ornamentais, como o mármore e o granito, a indústria sucroalcooleira e o agroturismo. A pastagem é o principal uso do solo da bacia, ocupando cerca de 47% da sua área, sendo localizada principalmente nas porções mediana e baixa da bacia. Os fragmentos florestais estão distribuídos na parte alta da cabeceira e seu uso corresponde a cerca de 21% e o cultivo agrícola a 16% (IJSN e AGERH, 2018).
O clima na bacia se enquadra como subtropical de altitude, com inverno seco e verão ameno (Cwb), clima subtropical de inverno seco (com temperaturas inferiores a 18ºC) e verões quentes (com temperaturas superiores a 22ºC) (Cwa) e clima tropical, com estação chuvosa no verão, de novembro a abril, e nítida estação seca no inverno, de

maio a outubro (Aw) (IJSN e AGERH, 2018). A precipitação oscila de 919 mm/ano (na região costeira) a 1.733 mm/ano e apresenta valor médio de 1.320 mm/ano, sendo a maior incidência de chuva sobre a Serra do Caparaó, onde situam-se suas nascentes, ocasionada, principalmente, pela topografia bastante acidentada (IJSN e AGERH, 2018). No litoral, as chuvas distribuem-se melhor entre as quatro estações do ano, enquanto na parte alta há um grande contraste entre os totais pluviométricos do verão e do inverno. A vazão média de longo período é de 92,77 m³/s e a vazão mínima Q_{90} é 30,88m³/s (IJSN e AGERH, 2018).

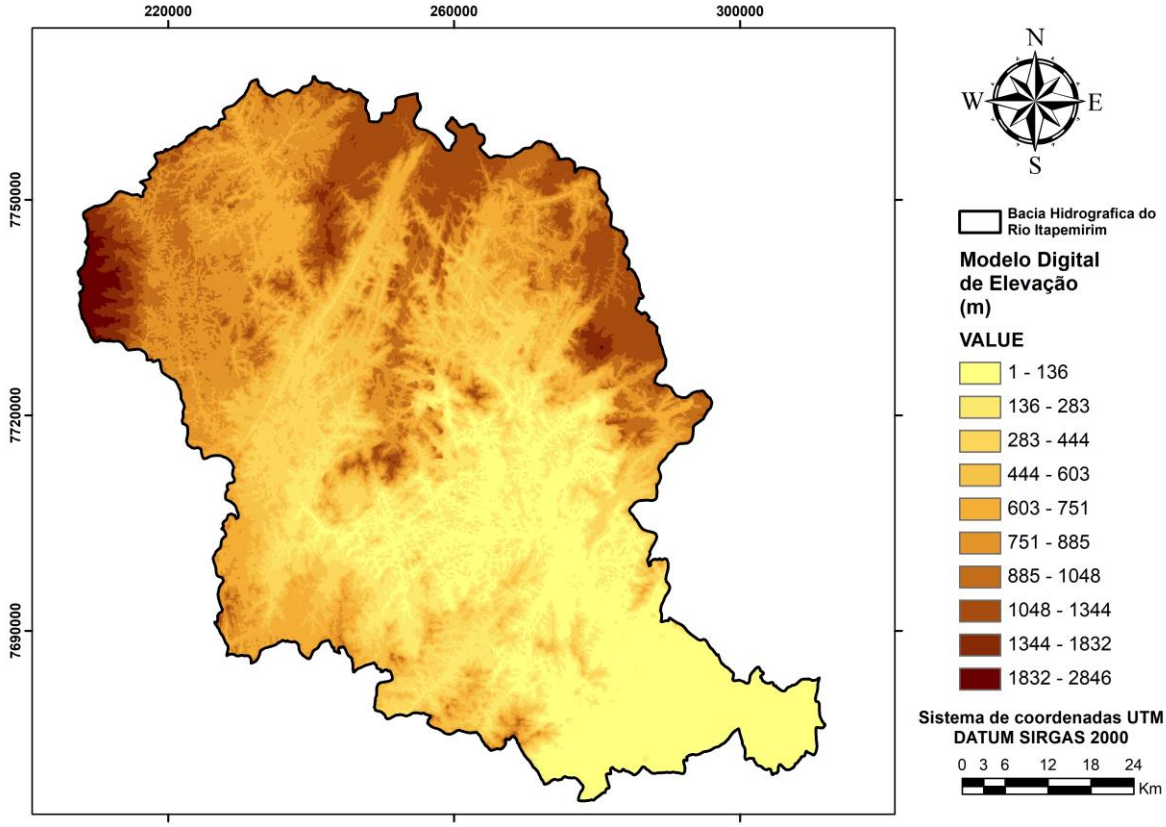
O relevo da bacia é considerado acidentado. Na porção oeste e interior da bacia há presença de planaltos, e na região costeira ou litorânea há predominância de planícies. Quanto aos aspectos pedológicos, há predomínio do Cambissolo Háplico (25,71%), seguido pelo Latossolo Amarelo (22,09%) e Argissolo Vermelho (10,05%). O Cambissolo Háplico compreende solos minerais não hidromórficos, bem drenados, pouco profundos a profundos, apresentando restrições à exploração agrícola. O Latossolo Amarelo é em geral profundo e bem estruturado, sempre ácido, nunca hidromórfico, porém são pobres em nutrientes para as culturas. O Argissolo Vermelho compreende solos de profundidade variável, constituídos por material mineral (IJSN e AGERH, 2018).

Os modelos SWAT e MGB requerem dados de entrada relacionados com as características fisiográficas e climáticas da bacia hidrográfica de estudo, apresentados nos itens a seguir.

4.2.1 Modelo Digital de Elevação (MDE)

O MDE utilizado no presente estudo foi obtido a partir de mosaicos da Missão Topográfica Radar Shuttle (SRTM) com resolução espacial de 90 metros, do projeto “Brasil em Revelo” coordenado pela Embrapa Monitoramento por Satélite (Figura 2).

Figura 2 – Modelo Digital de Elevação da bacia do Rio Itapemirim



Fonte: o autor.

4.2.2 Tipo e uso e ocupação do solo

4.2.2.1 Uso do solo

No presente estudo, dois mapas de uso do solo foram considerados. O primeiro, obtido no banco de dados GEOBASES, referente ao uso do solo no Espírito Santo nos anos 2007/2008, com escala 1:25.000; o outro, obtido no site do IBGE, que cobre todo o país, no ano de 2007, com escala 1: 5.000.000. A necessidade de se obter dois mapas distintos para a bacia está no fato desta possuir uma pequena área fora do estado do Espírito Santo, no estado de Minas Gerais. O mapa do GEOBASES, mais detalhado, foi utilizado para cobrir a porção espírito santense e o mapa do IBGE, menos detalhado, a porção mineira.

Para a modelagem com o SWAT os trinta e um usos originais da bacia foram simplificados em oito classes principais e estas caracterizadas com as respectivas classificações determinadas pelo programa. Os usos do solo representados pelo café

(COFFE) e floresta nativa (FOREST EVERGREEN) não foram mesclados com outros usos, por serem considerados predominantes (14 e 16% respectivamente). Os outros cultivos agrícolas foram todos unidos na classe AGRICULTURAL LAND-GENERIC. Os usos não definidos (usos diversos e outros) também entraram nessa classificação, uma vez que a bacia possui grande ocupação agrícola. Todos os usos com pastagem foram mesclados na classe PASTURE. A macega, por ser um tipo de vegetação encontrada em pastagens, também foi assim classificada. Os diferentes reflorestamentos foram unidos na classe FOREST-MIXED e as águas e zonas úmidas na classe WATER. Os usos com maior propensão a geração de escoamento superficial foram unidos na classe BARREN.

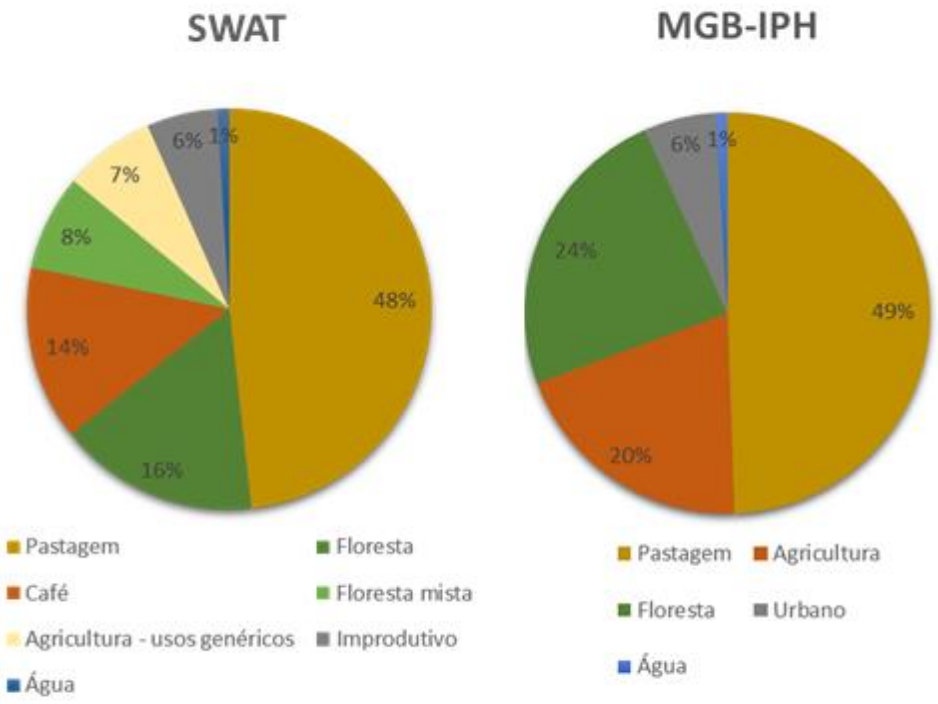
Para a modelagem utilizando o MGB, os usos originais foram simplificados em cinco classes principais. A classe URBAN foi considerada semelhante à BARREN considerada no SWAT. As classes PASTURE e WATER se mantiveram. As florestas e reflorestamentos foram unidos em uma única classe, FOREST, e o café e outros cultivos agrícolas em AGRICULTURE.

O modelo SWAT requer uma grande quantidade de parâmetros para cada classe de uso do solo. Desta forma, foram utilizados aqueles já configurados no banco de dados, com finalidade de simplificação da aplicação. Para cada informação de uso do solo foram atribuídos parâmetros para as estimativas de vazões pelo SWAT, sendo considerados valores indicados pelo USDA.

O modelo MGB considera os parâmetros relacionados à vegetação, uso e ocupação do solo como fixos, por possuírem valores que podem ser medidos ou que não interferem profundamente nos resultados. Estes parâmetros podem variar em cada mês do ano e/ou em cada bloco. Os valores foram obtidos seguindo recomendação do manual do modelo e obtidos por Collischonn (2001).

O detalhamento das simplificações realizadas, bem como os parâmetros utilizados no MGB são apresentados no Anexo A e Anexo B. As porcentagens correspondentes aos diferentes usos do solo para cada modelo são apresentadas na Figura 3.

Figura 3 – Percentagens relativas às diferentes classes de uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim consideradas para os modelos SWAT e MGB



4.2.2.2 Tipo do solo

Para os tipos de solo, dois mapas foram considerados. O primeiro, obtido no banco de dados GEOBASES, referente aos tipos do solo no Espírito Santo, gerado em 2016, com escala 1:25.000; o outro, disponibilizado pela Embrapa e publicado pelo IBGE em 2001, cobrindo todo o país, com escala 1: 5.000.000.

Para a modelagem com o SWAT relativa aos tipos de solo foi utilizada classificação apenas no primeiro nível categórico. Para o MGB, os solos foram classificados em rasos ou profundos utilizando a classificação indicada pelo SCS-USDA (BRANDÃO, PRUSKI e SILVA, 2004). Os latossolos, argissolos, chernossolos, nitossolos e os espodossolos podem ser considerados como uma categoria de solos com tendência a gerar menos escoamento superficial, sendo considerados ‘profundos’. Os cambissolos e os neossolos são solos mais rasos, que ocorrem em regiões de relevo mais movimentado, com tendência a gerar mais escoamento superficial, sendo classificados ‘rasos’.

Para a modelagem no SWAT, foi necessária incrementação, ao banco de dados original do modelo, de informações sobre os tipos de solo da bacia, uma vez que estes não estavam disponíveis. As informações necessárias estão relacionadas às

características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas e seus valores foram obtidos com base na literatura e em aplicações anteriores do SWAT (BALDISSERA, 2005; DA SILVA, 2011; FUKUNAGA, 2012; MOREIRA, 2017; OLIVEIRA, 2014; PEREIRA, 2013; SARTORI; GENOVEZ; LOMBARDI NETO, 2005).

No MGB os parâmetros relacionados com o solo são considerados calibráveis pelo programa, podendo variar de acordo com as classes de resposta hidrológicas e/ou sub-bacias. Em um primeiro momento, os valores foram considerados iguais para todas as sub-bacias, sendo ajustados posteriormente, no decorrer da calibração. Os valores foram obtidos seguindo a recomendação do manual do modelo e obtidos por Collischonn (2001).

O detalhamento das simplificações realizadas relativas aos tipos de solo, bem como os valores dos parâmetros utilizados no MGB e SWAT são apresentados no Anexo C e Anexo D.

4.2.3 Dados climáticos

4.2.3.1 Precipitação

A precipitação é a principal força dos modelos para obtenção dos resultados. O U.S. Army Corps of Engineers (1996) recomenda uma equação empírica para determinação da quantidade de estações de monitoramento (N_g) para uma determinada área (A):

$$N_g = A^{0.33} \quad (7)$$

Em que A se refere à área da bacia em milhas quadradas (2,59km² = 1mi²).

Por esta equação seriam necessárias aproximadamente 13 estações pluviométricas na área da bacia. Porém foram utilizadas mais estações, 18 no total.

A precipitação média anual no período simulado (1999 a 2013) variou entre 1.000 e 1.800mm, sendo que o período chuvoso compreende os meses de novembro a março (Figura 5). Os maiores índices de pluviosidade estão localizados na região central da bacia.

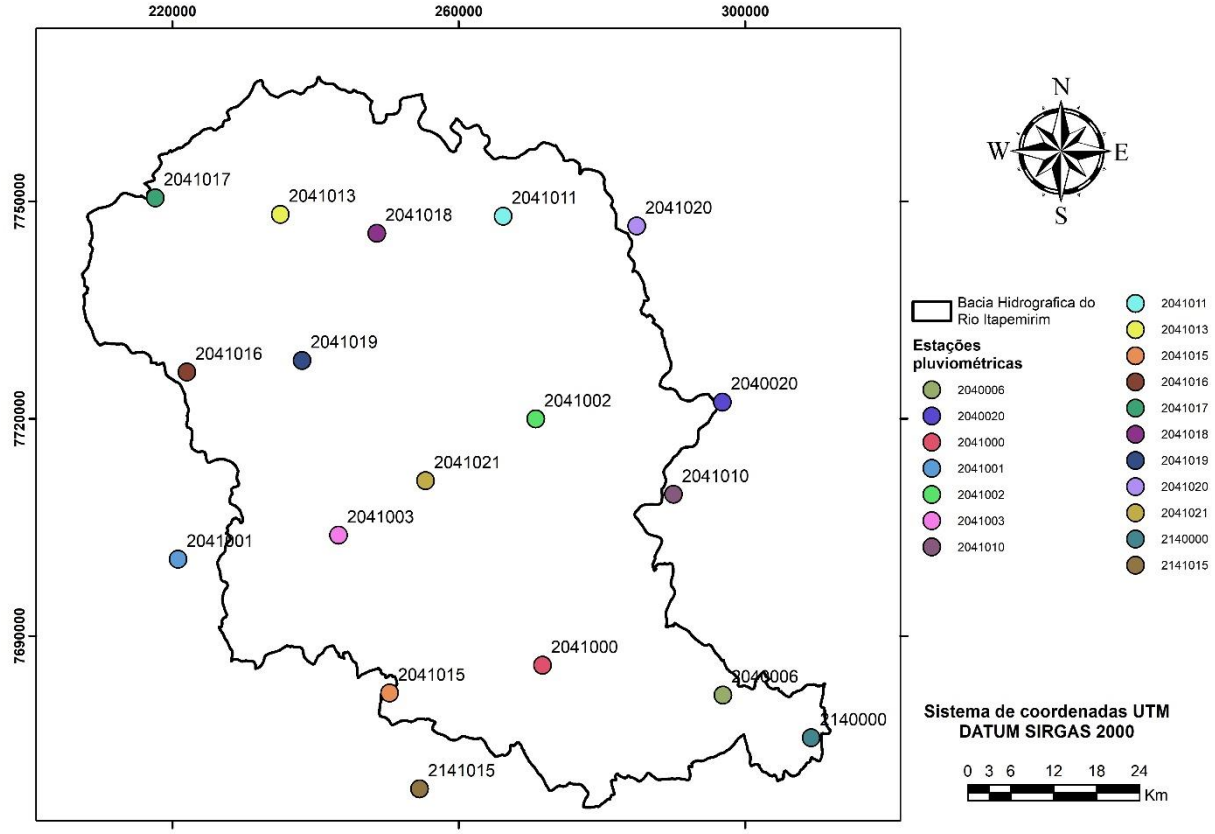
Os dados de precipitação foram obtidos através do Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA). Na Tabela 3 estão apresentadas as principais informações a respeito dos postos pluviométricos utilizados e na Figura 4 a localização dos postos na bacia do rio Itapemirim.

Tabela 3 – Informações relativas aos postos pluviométricos

Código	Posto Pluviométrico	Latitude (m)	Longitude (m)	Altitude (m)
2040006	Usina Paineiras	296903	7681838	40
2040020	Vila Nova Maravilha	296841	7722288	980
2041000	Atílio Vivacqua	271702	7685942	76
2041001	Guaçuí	220799	7700590	576
2041002	Castelo	270750	7719951	107
2041003	Rive	243212	7703905	127
2041010	Jacigua (DNOS)	289992	7709537	580
2041011	Conceição Do Castelo (DNOS)	266227	7747954	600
2041013	Iúna	235083	7748211	615
2041015	Fazenda Monte Alegre	250341	7682102	450
2041016	Ibitirama	222052	7726424	794
2041017	Santa Cruz - Caparaó	217628	7750481	920
2041018	Usina Fortaleza	248556	7745578	580
2041019	Itaici	238118	7728042	380
2041020	Arace (Fazenda Modelo)	284866	7746592	1075
2041021	Burarama	255377	7711430	180
2140000	Barra Do Itapemirim (DNOS)	309245	7675927	4
2141015	Mimoso Do Sul	254522	7668872	67

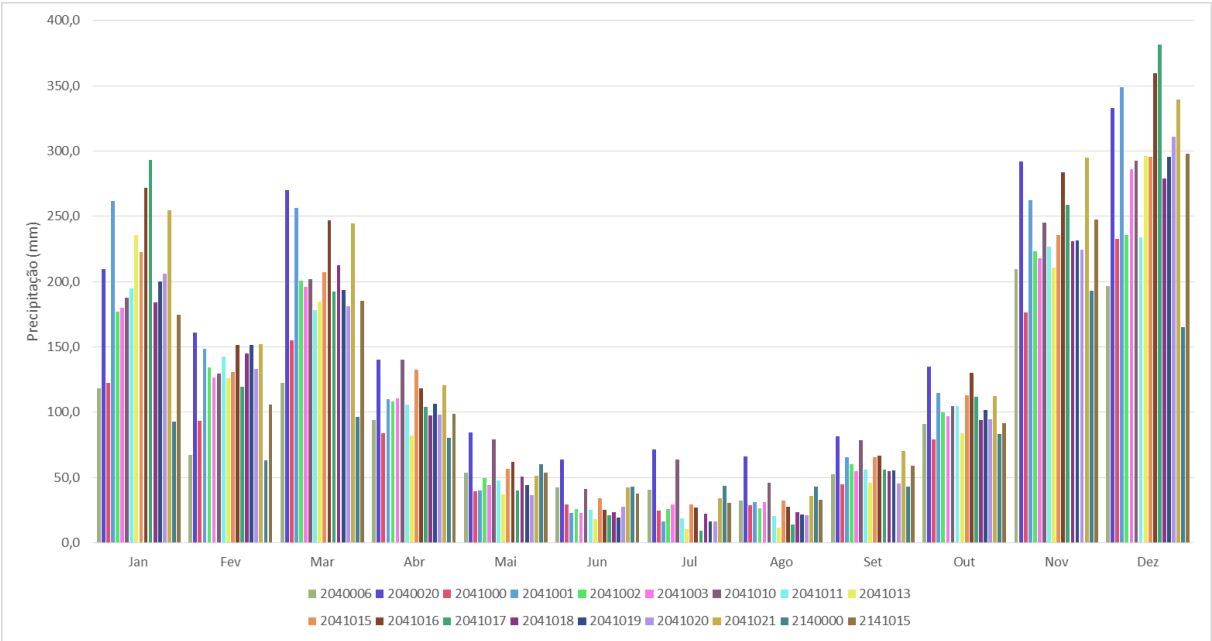
Fonte: o autor.

Figura 4 – Mapa de localização das estações pluviométricas



Fonte: o autor.

Figura 5 – Média das precipitações mensais (m³/s) para o período 1999 a 2013, para as estações consideradas



A precipitação média anual no período considerado na modelagem (1999 a 2013) variou entre 1.000 e 1.800mm, sendo que o período chuvoso compreende os meses de novembro a março. Os maiores índices de pluviosidade estão localizados na região central da bacia.

4.2.3.2 Outras variáveis climáticas

Os dados climáticos utilizados na entrada foram obtidos de diferentes fontes, uma vez que a necessidade de detalhamento temporal e tipo de dado requerido para cada um dos modelos eram diferentes. O MGB apresenta bons resultados com o uso de normais climatológicas, sendo possível obtê-las dentro do próprio modelo, enquanto para o SWAT dados diários são recomendados. Desta forma foram utilizadas normais climatológicas de 1981 a 2010 do INMET obtidos na base interna de dados do MGB e, para a modelagem do SWAT, foram utilizados dados diários CFSR (Climate Forecast System Reanalysis), disponíveis para download na página oficial do modelo. O CFSR foi projetado e executado como um sistema global para fornecer estimativas de alta resolução do sistema atmosfera – oceano – superfície terrestre. A resolução de tempo do conjunto de dados é diária e a precisão espacial é de aproximadamente 38 km (~ 0,312 °) em uma grade global.
As informações relativas às estações estão apresentadas na Tabela 4. Na Figura 6 é apresentada a localização das estações em relação à bacia de estudo.

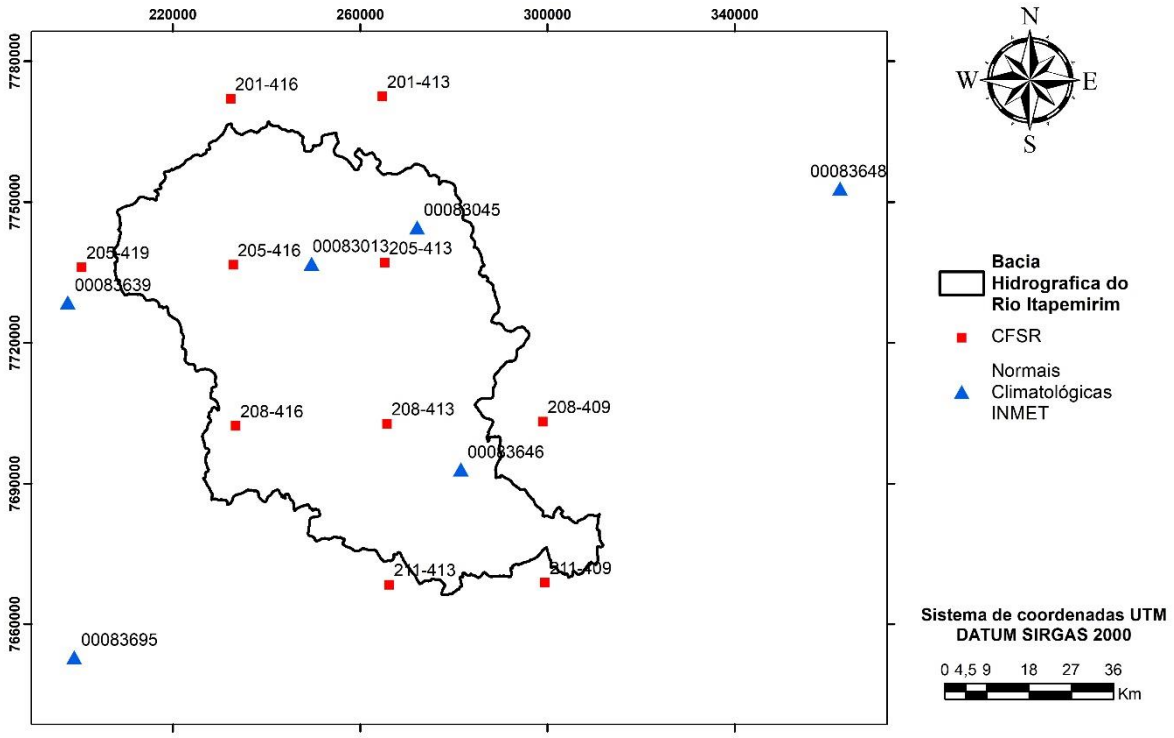
Tabela 4 – Informações a respeito dos postos meteorológicos

Código	Fonte	Posto climatológico	Latitude (m)	Longitude (m)	Altitude (m)
205-419	CFSR	-	199506	7736080	1.066
208-416	CFSR	-	233452	7702302	454
201-416	CFSR	-	232380	7770967	657
211-413	CFSR	-	266240	7667347	109
208-413	CFSR	-	265743	7702783	133
205-413	CFSR	-	265268	7737110	624
201-413	CFSR	-	264801	7771436	912
211-409	CFSR	-	298457	7667771	86
208-409	CFSR	-	298028	7703201	823
205-416	CFSR	-	232912	7736635	869
00083013	INMET	Muniz Freire	249613	7736887	530
00083045	INMET	Venda Nova	272471	7744959	710

(conclusão)

Código	Fonte	Posto climatológico	Latitude (m)	Longitude (m)	Altitude (m)
00083646	INMET	Cachoeiro do Itapemirim	281495	7693027	77
00083648	INMET	Vitória	362193	7752556	36
00083639	INMET	Caparaó	197555	7728289	843
00083695	INMET	Itaperuna	198914	7652960	124

Figura 6 – Mapa de localização das estações climatológicas



Fonte: o autor.

As Tabelas 5 a 8 e as Figuras 7 a 10 mostram as médias dos meses, normais climatológicas, para a velocidade do vento, umidade relativa, temperaturas máxima e mínima nas estações consideradas nas modelagens com o SWAT e o MGB.

Tabela 5 – Média mensal da velocidade do vento (m/s) para as estações consideradas.

	Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
	205-419	2,3	1,9	1,7	1,6	1,8	1,8	2,0	2,2	2,4	2,4	2,4	2,2
	208-416	2,1	1,9	1,7	1,6	1,7	1,8	2,0	2,2	2,3	2,3	2,2	2,1
	205-416	2,3	2,0	1,8	1,6	1,8	1,8	2,1	2,2	2,4	2,4	2,4	2,2
SWAT	201-416	2,1	1,9	1,7	1,6	1,7	1,7	1,9	2,1	2,3	2,4	2,3	2,1
	211-413	1,9	1,9	1,7	1,6	1,6	1,7	1,9	2,2	2,3	2,3	2,1	1,9
	208-413	2,1	2,0	1,7	1,6	1,7	1,8	2,0	2,2	2,3	2,4	2,2	2,0
	205-413	2,2	2,0	1,8	1,6	1,8	1,8	2,1	2,2	2,4	2,4	2,4	2,2

(conclusão)

	Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
SWAT	201-413	2,1	1,9	1,7	1,6	1,7	1,7	1,9	2,1	2,3	2,4	2,3	2,1
	211-409	2,5	2,4	2,1	1,9	2,0	2,1	2,3	2,8	3,0	3,0	2,7	2,5
	208-409	2,4	2,2	1,9	1,8	1,9	2,0	2,2	2,5	2,7	2,7	2,5	2,3
MGB	83648	4,5	4,2	4,1	3,8	3,7	3,4	4	4,1	4,5	4,5	4,7	4,5
	83639	2,2	2,2	1,9	1,7	1,4	1,5	1,8	1,9	1,9	2,2	2,1	2,0

Tabela 6 – Média mensal da umidade relativa para as estações consideradas

	Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
SWAT	**205-419**	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9
	208-416	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9
	205-416	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9
	201-416	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9
	211-413	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8
	208-413	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9
	205-413	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9
	201-413	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9
	211-409	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8
	208-409	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8	0,8
MGB	**83648**	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
	83639	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8
	83695	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8

Tabela 7 – Média mensal da temperatura mínima (°C) para as estações consideradas

	Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
SWAT	205-419	17,3	17,1	16,8	15,2	12,8	12,0	11,9	12,6	14,0	15,6	16,4	17,4
	208-416	18,4	18,3	17,9	16,2	13,8	13,5	13,3	14,0	15,1	16,6	17,2	18,3
	205-416	17,4	17,1	16,9	15,2	12,9	12,2	12,0	12,7	14,1	15,6	16,4	17,4
	201-416	17,3	17,0	16,6	15,3	12,8	11,8	11,7	12,6	14,2	15,8	16,7	17,5
	211-413	20,3	20,4	20,0	18,4	16,0	15,6	15,4	16,0	17,1	18,6	19,0	20,1
	208-413	19,0	18,9	18,5	16,6	14,3	14,0	13,9	14,5	15,6	17,1	17,7	18,7
	205-413	17,4	17,2	16,9	15,1	12,9	12,2	12,1	12,7	14,0	15,5	16,4	17,4
	201-413	17,1	16,7	16,5	15,0	12,7	11,6	11,5	12,3	13,8	15,4	16,4	17,2
	211-409	21,4	21,5	21,2	19,6	17,4	16,9	16,6	17,3	18,2	19,6	20,0	21,0
	208-409	20,0	20,0	19,6	17,6	15,5	15,0	14,9	15,5	16,6	18,0	18,6	19,6
MGB	83648	23,8	24,1	23,9	22,9	21,1	19,9	19,5	19,7	20,3	21,4	22,1	23,1
	83695	22,3	22,3	22,1	20,7	17,8	16	15,7	16,3	18,1	19,9	21,0	21,9

Tabela 8 – Média mensal da temperatura máxima (°C) para as estações consideradas

	Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
SWAT	205-419	24,7	25,5	24,6	23,5	22,0	21,7	21,6	23,4	24,4	25,5	23,9	24,6
	208-416	27,0	27,7	26,5	25,2	23,5	23,4	23,3	25,2	26,2	27,3	25,6	26,6
	205-416	25,2	26,0	25,0	23,9	22,4	22,0	21,9	23,7	24,7	25,8	24,2	25,0

(conclusão)

	Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
SWAT	201-416	25,5	26,3	25,5	24,5	23,1	22,5	22,4	24,1	25,1	26,3	24,8	25,4
	211-413	30,1	31,0	29,8	28,3	26,6	26,4	26,1	27,7	28,3	29,8	28,7	29,8
	208-413	28,1	28,9	27,5	26,1	24,5	24,4	24,1	25,8	26,7	28,0	26,6	27,7
	205-413	25,6	26,4	25,3	24,1	22,6	22,2	22,0	23,6	24,6	25,8	24,4	25,3
	201-413	25,2	26,1	25,2	24,2	22,8	22,3	22,0	23,6	24,5	25,7	24,4	25,0
	211-409	30,2	31,1	30,0	28,6	27,0	26,5	26,1	27,2	27,7	29,1	28,5	29,7
	208-409	28,7	29,6	28,3	26,9	25,3	25,0	24,7	25,9	26,7	28,1	27,2	28,4
MGB	83648	31,2	31,7	31,4	30	28,1	27,1	26,4	26,7	27	28,1	28,5	30

Figura 7 – Média mensal da velocidade do vento (m/s) para as estações consideradas

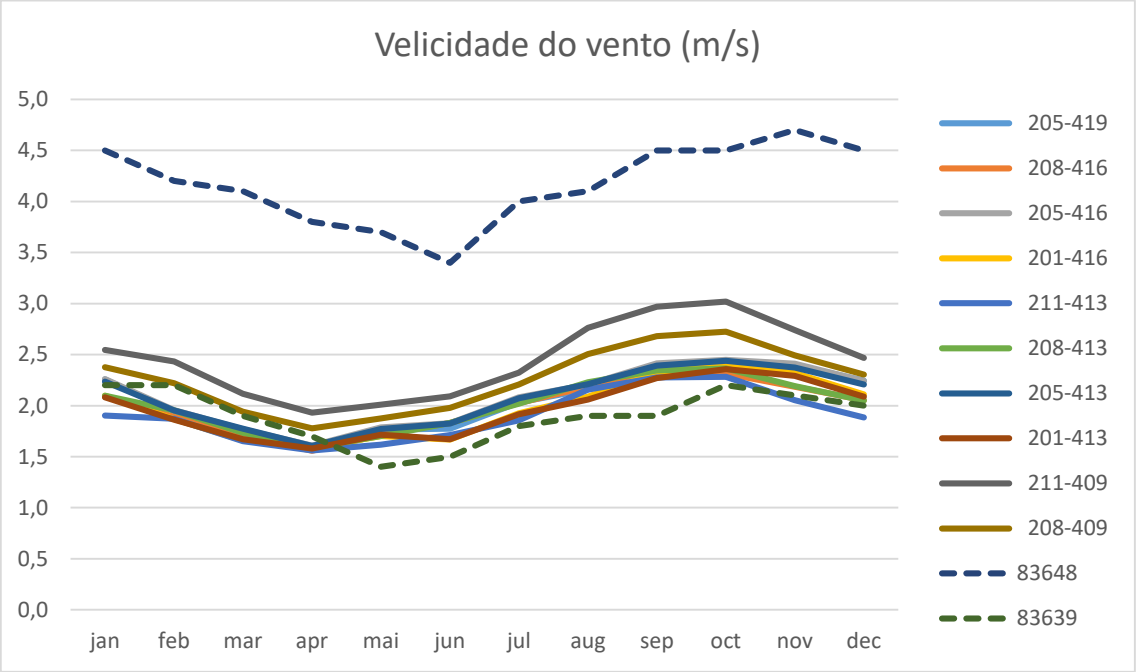


Figura 8 – Média mensal da umidade relativa para as estações consideradas

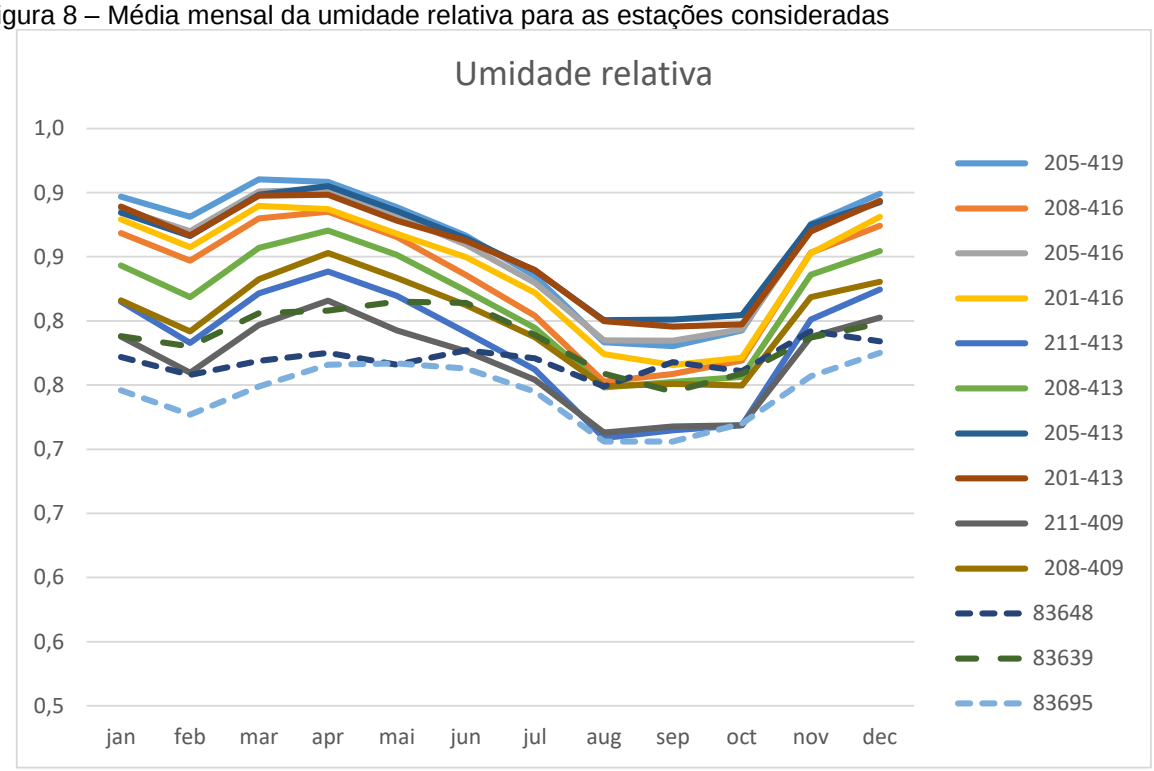


Figura 9 – Média mensal da temperatura máxima (°C) para as estações consideradas

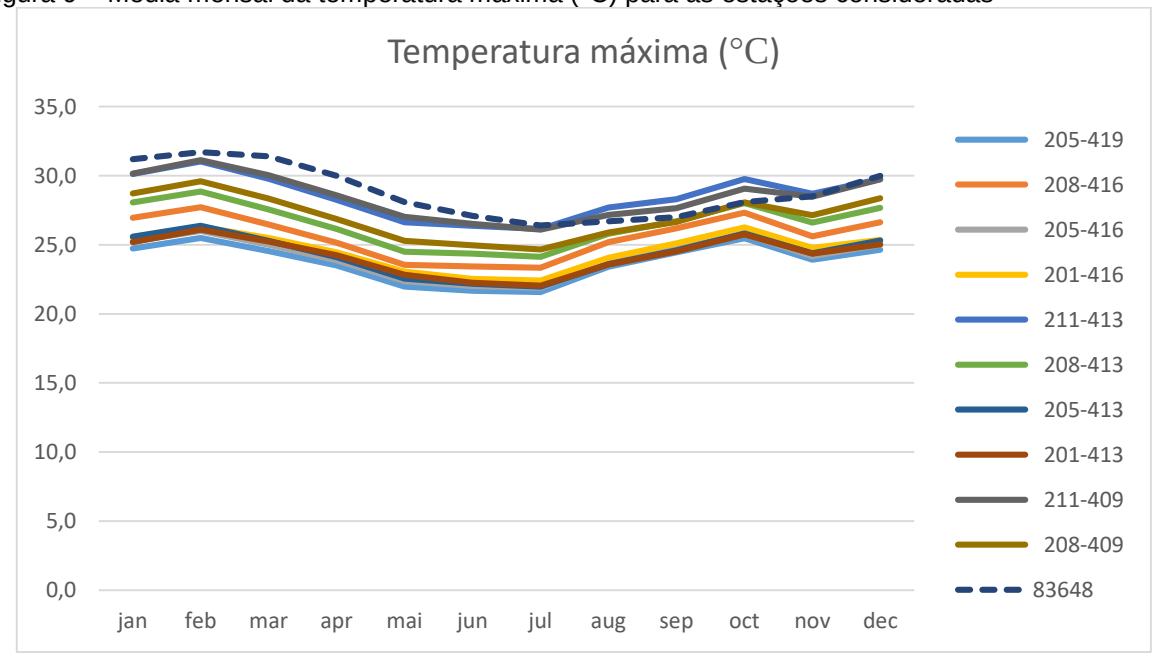
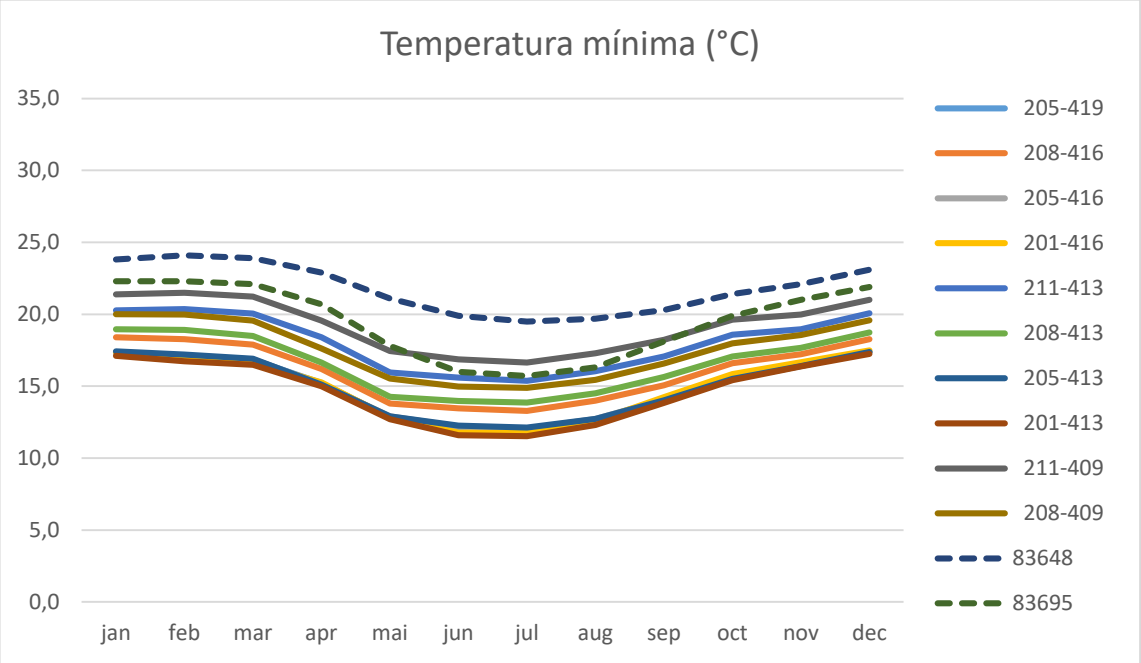


Figura 10 – Média mensal da temperatura mínima (°C) para as estações consideradas



Devido ao fato das informações requeridas pelo SWAT e pelo MGB serem diferentes só foi possível comparar valores de temperaturas máximas e mínimas, umidades relativas e velocidades do vento. Quanto à velocidade do vento, é possível observar que os valores referentes à estação 83648 (Vitória) se apresentam muito superiores aos demais. Porém, pelo fato desta estação estar muito distante da bacia do rio Itapemirim, seus valores são considerados em poucas minibacias, não interferindo significativamente nos resultados da modelagem com o MGB.

4.2.4 Vazão

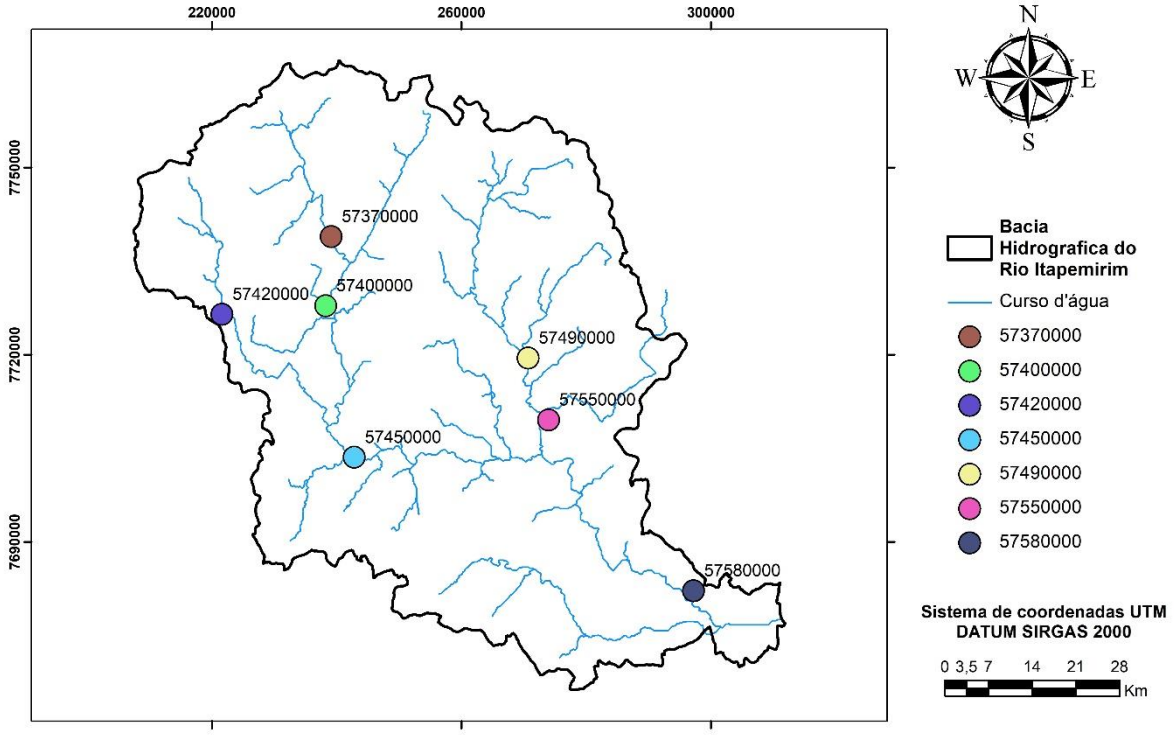
Foram considerados dados de vazões de 7 (sete) postos fluviométricos operados pela Agência Nacional de Águas (ANA) na bacia do rio Itapemirim. Os postos foram escolhidos em função da disponibilidade de dados para o período de modelagem (01/01/1999 a 31/12/2013). Os dados de vazão são utilizados em comparações com os valores simulados pelos modelos, nas etapas de calibração e validação.

A Tabela 9 apresenta informações a respeitos dos postos fluviométricos considerados. A Figura 11 mostra a localização dos mesmos postos.

Tabela 9 – Informações relativas aos postos fluviométricos considerados

Código	Posto Fluviométrico	Rio	Latitude (m)	Longitude (m)	Área de drenagem (km²)
57370000	Terra Corrida Montante	Pardo	239141	7738946	566
57400000	Itaici	Braço norte esquerdo	238267	7727856	1.010
57420000	Ibitirama	Braço norte direito	221592	7726483	337
57450000	Rive	Itapemirim	242811	7703555	2.180
57490000	Castelo	Castelo	270725	7719464	972
57550000	Usina São Miguel	Castelo	273986	7709540	1.420
57580000	Usina Paineiras	Itapemirim	297242	7682152	5.170

Figura 11 – Localização das estações fluviométricas



Fonte: o autor.

A Tabela 10 e a

Figura 12 mostram os valores das médias das vazões mensais, para o período 1999 a 2013, para as estações fluviométricas consideradas.

Tabela 10 – Média das vazões mensais (m³/s) para o período 1999 a 2013, para as estações consideradas.

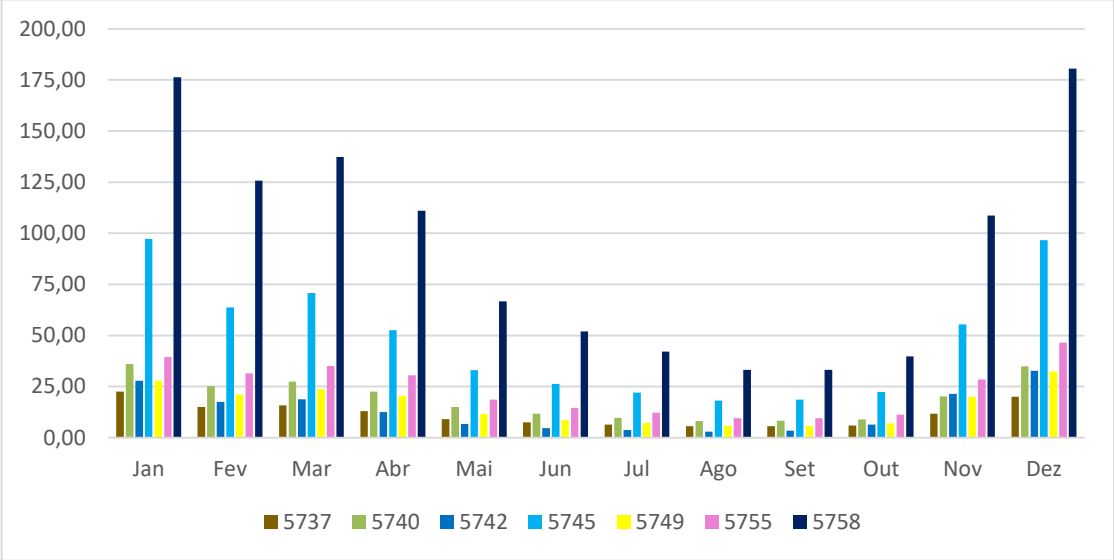
Mês	57370000	57400000	57420000	57450000	57490000	57550000	57580000
Jan	22,55	36,02	27,89	97,29	27,79	39,51	176,25
Fev	15,05	25,22	17,53	63,67	21,15	31,41	125,69

Mar	15,80	27,39	18,81	70,72	23,83	35,13	137,34
Abr	12,95	22,46	12,48	52,52	20,50	30,46	110,92

(conclusão)

Mês	**57370000**	**57400000**	**57420000**	**57450000**	**57490000**	**57550000**	**57580000**
Mai	9,03	14,99	6,71	33,04	11,61	18,58	66,69
Jun	7,48	11,74	4,62	26,26	8,63	14,56	52,02
Jul	6,47	9,65	3,75	21,99	7,17	12,21	42,09
Ago	5,59	8,06	2,99	18,18	5,77	9,49	33,25
Set	5,67	8,20	3,49	18,61	5,84	9,51	33,19
Out	6,01	8,90	6,40	22,43	7,06	11,28	39,79
Nov	11,75	20,19	21,48	55,40	20,02	28,43	108,69
Dez	20,00	34,91	32,67	96,60	32,33	46,44	180,48

Figura 12 – Média das vazões mensais (m³/s) para o período 1999 a 2013, para as estações consideradas



A Tabela 10 e a

Figura 12 mostram que os meses do período novembro a abril apresentam maiores vazões médias. A Tabela 11 apresenta os valores das médias específicas das vazões mensais, para o período 1999 a 2013, para as estações fluviométricas consideradas. A maior vazão específica ocorre na estação 57420000, localizada mais a oeste da bacia.

Tabela 11 – Vazão específica média (L/s.km²) para o período 1999 a 2013, para as estações consideradas.

Mês	**57370000**	**57400000**	**57420000**	**57450000**	**57490000**	**57550000**	**57580000**
Jan	39,84	35,66	82,77	44,63	28,59	27,83	34,09
Fev	26,59	24,97	52,03	29,20	21,76	22,12	24,31
Mar	27,92	27,12	55,80	32,44	24,51	24,74	26,56

Abr	22,89	22,23	37,03	24,09	21,09	21,45	21,46
Mai	15,96	14,84	19,92	15,16	11,94	13,08	12,90
Jun	13,22	11,63	13,72	12,05	8,88	10,25	10,06
Jul	11,43	9,56	11,14	10,09	7,38	8,60	8,14

(conclusão)

Mês	**57370000**	**57400000**	**57420000**	**57450000**	**57490000**	**57550000**	**57580000**
Ago	9,88	7,98	8,86	8,34	5,94	6,68	6,43
Set	10,01	8,12	10,36	8,54	6,01	6,69	6,42
Out	10,61	8,82	18,99	10,29	7,26	7,94	7,70
Nov	20,76	19,99	63,75	25,41	20,60	20,02	21,02
Dez	35,34	34,56	96,93	44,31	33,27	32,70	34,91

4.3 MODELAGEM COM O MGB

A metodologia utilizada para aplicação do modelo MGB foi a indicada pelo manual de exemplo de aplicação do modelo MGB 2017 utilizando o IPH-Hydro Tools (JARDIM et al., 2017)**.** Para isso foi utilizada a versão 2017 do MGB para MapWindowsGIS e o IPHydroTools disponíveis na página https://www.ufrgs.br/hge/mgb/downloads/. Os plug-ins foram adicionados ao MapWindowGIS 4.8.6. Todos os softwares utilizados são gratuitos.

A primeira parte da modelagem consiste na discretização da bacia. Nesta fase é definida a rede de drenagem, sendo delimitadas a bacia hidrográfica e as sub-bacias, obtidas as minibacias e criadas as classes de resposta hidrológicas. A rede de drenagem foi delimitada seguindo um limite de 30km². Este valor foi escolhido por meio da análise qualitativa e comparação visual com a hidrografia da bacia. Esta área representa menos de 1% da área total da bacia do rio Itapemirim (59 km^2), que seria a abordagem utilizada pelo conjunto de ferramentas ArcHydro.

A delimitação das sub-bacias foi realizada de acordo com a localização dos postos fluviométricos, para os quais existem dados de vazão. Estes seriam os exutórios de cada sub-bacia. Cabe observar que este critério de delimitação, apesar de amplamente utilizado, é focado na representação de pontos existentes, não levando em consideração os aspectos físicos da bacia (BUARQUE, 2015).

A criação das classes de respostas hidrológicas foi realizada utilizando os mapas de uso e tipo de solo. Diversos autores recomendam que a quantidade de classes de respostas hidrológicas não seja muito grande, uma vez que algumas combinações podem não ocorrer na realidade. Pequeno número de classes traz alguns benefícios,

como processamento mais rápido (principalmente na fase de calibração), calibração mais simples e com menor grau de liberdade. Além disso, não há grande benefício no uso de um maior número de URHs em termos de melhoria da representação dos hidrogramas. No presente estudo, considerando que a classificação de tipos e usos do solo foi simplificada, não foi necessária simplificação adicional.

A segunda etapa da modelagem consistiu na aplicação do modelo em si. Os dados de chuva, vazão e clima foram preparados, bem como definidos os valores dos parâmetros fixos e calibráveis (de vegetação e de solo respectivamente). Os arquivos foram compilados dentro do arquivo de projeto e foram realizadas as simulações. Para a manipulação dos dados de chuva e vazão foi utilizado o programa 'Super Manejo' 2.0.1, desenvolvido pelo grupo de pesquisa em Hidrologia de Grande Escala (HGE) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Os parâmetros fixos e calibráveis foram baseados nos intervalos recomendados pelo manual do modelo e em valores típicos. Na primeira rodada, os valores dos parâmetros calibráveis foram iguais para todas as sub-bacias.

4.3.1 Calibração e validação

A calibração foi realizada de montante para jusante sendo primeiramente calibradas as sub-bacias com exutórios nos postos fluviométricos 57370000, 57420000 e 57490000; em seguida as com exutórios nos postos 57400000 e 57550000; em seguida no posto 57450000; e, por último, no posto 57580000.

Algumas simulações necessitam de um período de aquecimento ou equilíbrio para determinação da condição inicial do modelo. A utilização deste período se torna mais importante quando o tempo de simulação é curto, sendo recomendável quando a simulação abrange 5 anos ou menos. ASABE (2017) define período de aquecimento como um período de simulação que precede o de interesse e é suficientemente longo para que as variáveis de estado, como a umidade do solo, vegetação ou níveis de reservatórios atinjam valores independentes das estimativas das condições iniciais. Geralmente um período de aquecimento de um ano é suficiente para que o ciclo hidrológico esteja totalmente operacional, sendo que quando a simulação abrange um período superior a 30 anos, o aquecimento é opcional (ARNOLD et al., 2013).

No presente estudo, foi realizada a calibração manual dos parâmetros considerados sensíveis por Collischonn (2001). O período de calibração foi de 2002 a 2007 e o de validação de 2008 a 2013. Os anos de 1999 a 2001 foram utilizados para aquecimento do modelo. Para esta etapa foi considerado o manual de calibragem do MGB (IPH, 2017).

4.4 MODELAGEM COM O SWAT

O primeiro passo da modelagem do SWAT consistiu no delineamento da bacia hidrográfica. Com base no MDE foram definidas a rede de drenagem, as entradas e saídas das sub bacias e os limites da bacia hidrográfica. A abordagem escolhida para definir a densidade da rede de drenagem foi a mesma utilizada para o MGB. Desta forma, foi definida uma área de 3.000 ha (30km²). Além dos exutórios das sub-bacias gerados automaticamente pelo programa, foram adicionados os pontos de localização dos postos fluviométricos, com dados de vazões observadas, com o objetivo de utilizá-los na calibração do modelo e excluídos os exutórios de sub-bacias muito pequenas, sendo geradas 115 sub-bacias.

A próxima etapa consistiu na definição das URHs, por meio da sobreposição dos mapas de tipo e uso do solo e de declividade. A declividade foi redefinida em quatro classes estipuladas conforme os valores estatísticos dos declives da bacia (máximo, mínimo, médio e desvio padrão). Com o objetivo de simplificar e reduzir a quantidade de URHs foram determinados limites para definição das mesmas: 5% para uso, 10% para tipo de solo e 10% para declividade. Isto é, URHs apresentando valores abaixo desses limites foram eliminadas da sub-bacia. Esses limites não foram aplicados para o uso do solo ‘água’. No total foram geradas 157 URHs, áreas apresentando iguais declividades, tipos e usos do solo ao longo das sub-bacias.

Após definição das URHs, foi realizada inserção de dados climatológicos de precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento, bem como dos valores dos parâmetros estatísticos climáticos, responsáveis pela geração de dados para preenchimento das falhas. A manipulação e o processamento desses dados foram realizados com auxílio dos softwares pcpSTAT e WeatherDataBase, ambos disponíveis na página do SWAT.

A última etapa de processamento no SWAT foi a simulação na qual foram definidos o período de simulação (1999 a 2013) com três anos de aquecimento, passo de tempo da simulação diária, e os dados de saída de interesse.

Após a simulação com o modelo SWAT, o SWAT-Check foi utilizado. O SWAT-Check é um programa stand-alone Microsoft Windows que lê a saída da simulação SWAT selecionada e alerta os usuários a respeito dos possíveis valores fora do intervalo típico; cria figuras baseadas em processos para a visualização da adequação dos valores de saída, incluindo saídas importantes que são comumente ignoradas; e detecta e alerta os usuários sobre erros comuns de modelagem (WHITE et al., 2014). O modelo foi analisado com auxílio do SWAT-Check e alguns avisos foram produzidos na seção de hidrologia: (i) a taxa de escoamento superficial pode estar baixa (<0,2) (ii) O fluxo lateral é maior que o fluxo de água subterrânea, o que pode indicar um problema (iv) O rendimento da água pode ser excessivo. (v) Vazão da água subterrânea pode ser baixa.

De acordo com White et al. (2014) estes avisos indicam que o escoamento superficial está muito baixo e o lateral, muito alto, sendo este o maior indicador de um problema. No SWAT, o fluxo lateral depende primeiramente da condutividade do solo, declividade e comprimento do declive. Desta forma, os parâmetros foram alterados segundo a Tabela 12, seguindo as recomendações propostas por White et al. (2014). As alterações foram realizadas até que os alertas fossem resolvidos e o NSE das estações fosse maior ou igual a 0,4.

Tabela 12 – Parâmetros alterados de acordo com o SWAT-CHECK

Parâmetro	Descrição	Unidade	Alteração
SLSUBBSN	Comprimento médio da rampa de declividade	m	*2,21 (slope 26,6 -999) * 1,3 (Slope 0 – 7,6) * 1,95 (Slope 7.6 – 26,6)
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo	mm/h	*0,3 (latossolo) *0,7 (outros solos)
ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base	Dia	0,02
CN	Número da curva	Adimensional	*0,56 (BARR) *0,8 (outros)
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no horizonte do solo	mm/mm	*1,2
GW_REVAP	Coeficiente de ascensão da água da zona de saturação	Adimensional	0,1

ESCO	Fator de compensação da evaporação no solo	Adimensional	0,7

* multiplicação.

Uma vez determinados os dados de saída, procedeu-se com a análise de sensibilidade dos parâmetros relacionados à produção de água na bacia hidrográfica, para posterior calibração e validação dos dados.

4.4.1 Análise de sensibilidade, calibração, validação

Para a realização das etapas de calibração, validação e análise de sensibilidade foi utilizado o programa SWAT-CUP por meio do algoritmo SUFI2, considerado eficiente para modelos em grande escala e que demandam muito tempo (YANG et al., 2008). Esta etapa foi realizada seguindo a metodologia proposta por Abbaspour et al. (2015) e Abbaspour, Vaghefi e Srinivasan (2017). O período de tempo, 1999 a 2013, foi dividido em três sub-períodos: 1999 a 2001 para aquecimento do modelo, 2002 a 2007 para calibração e 2008 a 2013 para validação.

Antes da calibração do modelo, foi necessário realizar análise de sensibilidade, uma vez que o SWAT é complexo e possui muitos parâmetros calibráveis na modelagem do processo de transformação chuva-vazão.

Os parâmetros escolhidos para esta análise foram aqueles considerados sensíveis em trabalhos relacionados à produção de água (FUKUNAGA et al., 2015; GUIMARÃES, 2016; MOREIRA, 2017; PEREIRA et al., 2014; TEIXEIRA, 2017) e na documentação do SWAT (NEITSCH et al. 2002). Na Tabela 13 são relacionados os parâmetros escolhidos para análise de sensibilidade, sua descrição, os limites inferior (LI) e superior (LS) para ajustes e o método de variação dos valores. Optou-se por não considerar alguns dos parâmetros destacados pelos autores, pelo fato deles não estarem relacionados com a realidade da bacia, como a ocorrência de neve, ou por estarem relacionados com alterações nas características geomorfológicas da bacia, como os parâmetros profundidade do solo (SOL_Z) e declividade da encosta (SLOPE).

A sensibilidade dos parâmetros foi estimada automaticamente pelo SWAT-CUP por meio da Análise de Sensibilidade Global (GSA). Esta técnica permite a identificação

dos parâmetros de maior sensibilidade no processo de calibração através do valor p do teste t-Student. Foram realizadas 300 iterações.

Tabela 13 – Parâmetros da análise de sensibilidade relacionados à produção de água

Parâmetro	Descrição	Unidade	LI	LS	Método
ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base	Dia	0	1	Substituição
BIOMIX	Eficiência da mistura biológica do solo	Adimensional	0	1	Substituição
CANMX	Quantidade máxima de água interceptada pela vegetação	mm	0	100	Substituição
CH_K2	Condutividade hidráulica do canal	mm/h	0	130	Adição
CH_N2	Coeficiente de Manning no canal principal	s/m³	0	0,3	Adição
CN2	Número da curva para condição de umidade II	Adimensional	-0,5	0,2	Multiplicação
CNCOEF	Coeficiente de ponderação usado para calcular a retenção nos coeficientes do número da curva dependentes da evapotranspiração das plantas (adimensional)	Adimensional	0,5	2	Substituição
EPCO	Fator de compensação da remoção de água pelas raízes	Adimensional	0	1	Substituição
ESCO	Fator de compensação da evaporação no solo	Adimensional	0	1	Substituição
GW_DELAY	Tempo de recarga do aquífero raso	Dia	0	450	Substituição
GW_REVAP	Coeficiente de ascensão da água da zona de saturação	Adimensional	0,02	0,2	Substituição
GWQMN	Profundidade do aquífero raso para escoamento de base	mm	-1000	130	Adição
RCHRG_DP	Fração de água percolada para o aquífero profundo	Fração	0	1	Substituição
REVAPMN	Profundidade da água no aquífero raso para que ocorra percolação	mm	0	500	Substituição
SLSUBBSN	Comprimento médio da rampa de declividade	m	-0,25	0,25	Multiplicação
SOL_ALB	Fração de albedo do solo na capacidade de campo	Adimensional	-0,25	0,25	Multiplicação
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no horizonte do solo	mm/mm	-0,4	0,4	Multiplicação
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo	mm/h	-0,5	0,5	Multiplicação
SURLAG	Tempo de retardo do escoamento superficial	Dia	0,05	24	Substituição
OV_N	O valor "n" de Manning para o fluxo terrestre.	Adimensional	-0,3	0,3	Multiplicação
LAT_TTIME	Tempo de percolação do fluxo lateral (dias)	Dia	0	25	Substituição

Os resultados das análises de sensibilidade foram avaliados pelos valores t-stat e p-value. Quanto maior o valor do t-stat mais sensível é o parâmetro. O valor do p-value determina a significância da sensibilidade, sendo que um valor próximo à zero indica maior significância.

Os parâmetros mais sensíveis para a região de estudo foram calibrados de forma automática e, posteriormente validados seguindo a metodologia Split-sample proposta por Klemeš (1986). A série temporal de referência foi dividida em duas partes. A primeira parte foi utilizada para calibração do modelo, enquanto que a segunda parte foi usada para validação. A função objetivo escolhida para ser otimizada foi o NSE com limite mínimo de 0,5, sendo realizada uma iteração com 500 simulações. Na validação do modelo, os parâmetros calibrados foram mantidos constantes. Os resultados da validação do modelo foram analisados utilizando os índices estatísticos estabelecidos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 PROCEDIMENTO PARA ESCOLHA DE MODELOS

A partir da bibliografia relativa à hidrologia e à modelagem selecionada (BEVEN, 2001, 2016; HUTTON et al., 2017; KHERDE, 2016; LI; XU; BELDRING, 2015; MENDOZA et al., 2015; SINGH, 2018; SITTERSON et al., 2017; VOGEL et al., 2015), no presente estudo foram levantadas informações importantes que serviram para auxílio no procedimento de escolha de modelos, que são apresentadas neste subitem.

No início do século 19 modelos de chuva-vazão eram restritos, em sua maioria, ao uso de fórmulas empíricas e ao método racional de transformação de chuva em escoamento superficial. Com os avanços do entendimento dos processos hidrológicos e da tecnologia, atualmente diversos modelos com diferentes abordagens estão disponíveis. A avaliação do modelo hidrológico deve ser feita dentro do contexto da questão de pesquisa ou do problema de tomada de decisão. De forma auxiliar a escolha de modelos, Kherde (2016) sugere levar em consideração:

- O equilíbrio entre os objetivos do trabalho de modelagem e a complexidade do modelo: A complexidade do modelo é definida pela escolha das variáveis, das escalas espaciais e temporais e da precisão que se deseja modelar.
- A disponibilidade de dados: Por exemplo, a escolha de um modelo hidrológico distribuído quando dados observados espacialmente distribuídos (como umidade do solo e padrões de níveis de água subterrânea) não estão disponíveis não é adequada, sendo melhor usar um modelo semi-distribuído.
  Quanto ao período da série de dados, Kherde (2016) recomenda que sejam utilizados pelo menos 10 anos de dados de entrada. Se o modelador estiver interessado em analisar a situação que ocorre uma vez em dez anos, o registro de entrada de pelo menos vinte anos seria suficiente. Este período pode variar com a condição climática e as características da bacia. Para modelos conceituais de chuva-vazão, o modelador deve incluir um evento catastrófico observado na calibração para refletir eventos raros.
- Complexidade do modelo: Um equilíbrio entre os objetivos de pesquisa, a disponibilidade de dados e a complexidade do modelo tornará a modelagem mais consistente e razoável. Obviamente, as incertezas não desaparecerão e as fontes mais importantes devem ser consideradas de forma integrada (não apenas as incertezas dos parâmetros). Modelos hidrológicos complexos requerem mais dados para calibração. Uma quantidade maior de dados pode conduzir a resultados mais significativos. No entanto, modelos hidrológicos simples às vezes apresentam melhor desempenho do que modelos complexos devido à escassez e à baixa qualidade de dados.

Além dos pontos levantados anteriormente, é importante considerar a habilidade e o conhecimento do modelador, os recursos financeiros e de tempo disponíveis e a capacidade computacional. A avaliação de como os processos que operam no sistema são representados pelo modelo é fundamental. O mesmo processo pode ser representado de várias maneiras, e não há como determinar qual é a forma funcional correta. Neste caso, indicadores estatísticos são úteis na verificação de qual modelo é mais relevante para uma finalidade específica.

A hidrologia é uma importante área das ciências ambientais. No entanto, é uma ciências inexata e, dadas as limitações do que é conhecido e possível de ser

representados em modelos, é provável que continue assim. Desta forma, Beven (2016) ressalta que ser honesto sobre essas limitações, para si mesmo e para aqueles que podem ser usuários da pesquisa ou dos resultados da modelagem é fundamental para melhor entendimento e evolução da hidrologia como ciência.

5.2 ESCOLHA DOS MODELOS UTILIZADOS

5.2.1 Atendimento aos critérios de Watson pelo SWAT e MGB

Para o presente estudo, foram selecionados os modelos hidrológicos distribuídos e baseados fisicamente SWAT e MGB. O modelo SWAT, desenvolvido pelo USDA-EUA, tem sido aplicado em bacias localizadas em grande quantidade de países, em todos os continentes. O modelo MGB, desenvolvido na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, tem sido aplicado principalmente em grandes bacias localizadas na América Latina.

De acordo com os critérios a serem considerados na seleção de modelos indicados por Watson & Burnett (1995), os modelos SWAT e o MGB foram avaliados da seguinte maneira, no caso considerado no presente estudo:

5.2.1.1 Os modelos são apropriados para a área de estudo e o problema investigado?

Watson & Burnett (1995) recomendam que o modelo utilizado seja bem compreendido pelo modelador, de modo que possa ser determinado se atenderá aos requisitos específicos do estudo e produzirá resultados precisos.

Os modelos considerados neste estudo são complexos e demandaram tempo para que os seus principais processos fossem compreendidos, sendo que ambos puderam ser considerados, em princípio, aptos para aplicação na bacia do rio Itapemirim, uma bacia tropical com área de drenagem de aproximadamente 6.000 km², dentro dos limites recomendados pelo modelo MGB (maior que 1.000 km²) e compatível com aplicações anteriores do SWAT (BRESSIANI, 2016; PEREIRA et al., 2016a; JAJARMIZADEH et al., 2016; MONTEIRO et al., 2016).

Na literatura, são apresentados diversos estudos envolvendo o modelo SWAT em estudos relacionados com bacias apresentando áreas de drenagem próximas da

correspondente ao rio Itapemirim. Vilaysane et al. (2015) utilizaram o modelo SWAT na modelagem hidrológica de uma bacia de 7.225 km² , localizada no sul do Laos, obtendo valores de NSE maiores que 0,7 para os períodos de calibração e validação. Pereira et al. (2016a,b) aplicaram o SWAT a uma bacia tropical brasileira com aproximadamente 8.600 km², concluindo que, apesar do modelo ter apresentado boas estimativas dos componentes do balanço hídrico, este necessita de aperfeiçoamentos quanto à representatividade da precipitação, sendo que as calibrações para algumas sub-bacias foram consideradas insatisfatórias. Havrylenko et al. (2016) utilizou o SWAT na simulação de uma bacia de 8.742 km², situada na região dos Pampas, na Argentina, obtendo resultados satisfatórios, segundo o critério de Moriasi et al. (2007), na simulação de vazões, com NSE=0,59 para o período de calibração e 0,75 para a validação.

Não foram encontradas na literatura citações a estudos relacionados com aplicações do MGB a bacias com áreas de drenagem próximas da apresentada pelo rio Itapemirim. A menor bacia citada na literatura encontrada para a qual foi aplicado este modelo foi a do rio Taquari-Antas, com 26.000 km^2 (COLLISCHONN et al., 2007). O modelo apresentou valores de NSE variando de 0,66 a 0,90 durante o período de calibração para as diferentes sub-bacias consideradas. Desta forma, o presente estudo visou também verificar o desempenho do modelo para bacias de menor porte.

Não foram observados na literatura estudos visando comparação entre os modelos SWAT e MGB. Foram encontrados alguns artigos nos quais são citados estudos comparando o SWAT com outros modelos (CORNELISSEN; DIEKKRUGER; GIERTZ, 2013; GOLMOHAMMADI et al., 2014; LIEW; ARNOLD; GARBRECHT, 2003; TEGEGNE; PARK; KIM, 2017). Segundo os autores destes artigos, o modelo apresentou bons desempenhos, principalmente quando aplicado em bacias maiores e mais complexas. Não forram encontrados estudos comparando o MGB com outros modelos.

No presente estudo, diversos aspectos dos modelos SWAT e MGB foram comparados. Além disto, foram feitas comparações de resultados de calibração e validação dos dois modelos relativos a vazões correspondentes a bacias e sub-bacias do rio Itapemirim. Cabe ressaltar que não foram encontradas na literatura referências indicando restrições ao uso dos modelos SWAT e MGB para aplicações específicas.

5.2.1.2 Quais são os dados de entrada necessários?

No presente estudo, os dados de entrada foram manipulados para atenderem aos formatos requeridos para aplicação de cada um dos modelos. Procurou-se utilizar dados de entrada atualizados e mapas apresentando melhores escalas disponíveis para a área de estudo.

A quantidade de dados de entrada requerida pelos modelos está relacionada com seus requisitos de escala e precisão. O SWAT possui requisitos muito rigorosos quanto à quantidade e ao detalhamento dos dados de entrada que, quando não cumpridos, podem causar dificuldades na sua manipulação. Apesar disto, os requisitos do modelo são bem documentados nos manuais (ARNOLD et al., 2012, 2013; NEITSCH et al., 2011) e no site https://swat.tamu.edu/ estão disponíveis ferramentas que auxiliam a manipulação.

Os dados de entrada espaciais e temporais do MGB são semelhantes aos requeridos para aplicações do SWAT. Desta forma, também requer manipulação de grande quantidade de dados. Cabe observar que o MGB possui uma base de dados interna que pode ser utilizada nas aplicações às bacias de estudo. O MGB requer menor nível de detalhamento, principalmente quanto aos mapas de tipo e uso do solo que, combinados, não devem abranger mais de doze classes.

De acordo com Buarque (2015) e Jardim et al. (2017), uma menor quantidade de classes traz benefícios como: processamento mais rápido (principalmente na fase de calibração), calibração mais simples e com menor grau de liberdade. Além disso, os autores afirmam que não há grande benefício no uso de maior número de classes em termos de melhoria da representação dos hidrogramas.

Segundo Bressiani et al. (2015) a coleta e a preparação de dados para simulações do SWAT no Brasil geralmente consomem muito tempo, o que representa uma dificuldade na condução de aplicações do modelo. Monteiro et al. (2016) destaca que a aquisição de dados climáticos de qualidade pode ser um grande desafio na modelagem, uma vez que são poucos os países que podem arcar com densa rede de estações meteorológicas e controlar a consistência dos dados coletados.

A coleta e a integração de dados de diversos campos de especialização e o domínio da implementação de software do modelo são os aspectos mais desafiadores da configuração do ArcSWAT (LEWARNE, 2009). Além disso, existe uma grande

escassez de dados para configurar e calibrar / validar o modelo, resultando na necessidade de usar dados e parametrizações mais genéricos, sendo os dados coletados em diversos campos de estudo e especialidades, cada um exigindo um nível de entendimento (LEWARNE, 2009).

Os dados necessários para aplicação de SIG utilizados no estudo possuem qualidades satisfatórias para aplicação dos modelos, condizendo com aplicações anteriores (PEREIRA et al., 2016b; FUKUNAGA et al., 2015; GEZA e MCCRAY, 2008; SALLES, 2012). Porém, a coleta dos dados relativos às características do solo para aplicação do SWAT foi uma tarefa demorada, uma vez que os parâmetros relativos aos diferentes tipos de solo exigidos para entrada no modelo não estão prontamente disponíveis para o Brasil. No caso da aplicação do MGB, devido à maior simplicidade na classificação de tipos de solo, esta tarefa foi mais fácil e menos demorada. Além disto, o manual do modelo sugere valores para os parâmetros e indica fontes na literatura.

5.2.1.3 Quais são os requisitos computacionais, facilidade de uso e suporte para o usuário?

Ambos modelos demandam computadores com bons processadores. A utilização de melhores hardwares faz com que os tempos gastos no preparo de dados de entrada e nas simulações sejam menores. Para este trabalho um computador laptop com 8GB de RAM e processador Intel Core i5-5200U de 2,2 GHz foi utilizado.

Os requisitos de espaço de armazenamento variam de acordo com as resoluções dos mapas utilizados e dos níveis de detalhamento e discretização dos resultados. O manual do SWAT2012/ArcSWAT (WINCHELL et al., 2013) apresenta os requisitos computacionais necessários para sua aplicação, obtidos após teste da interface: Hardware com um processador recente (2008 ou mais novo) com frequência de pelo menos 2 gigahertz e ao menos 2 GB de memória RAM, sendo 1 gigabyte de espaço de armazenamento para a instalação mínima e até 2 gigabyte para a instalação completa (incluindo conjunto de dados de demonstração e os dados US STATSGO). Além disso, um espaço de armazenamento adicional de 4-6 gigabyte é desejável para muitos dos projetos maiores de ArcSWAT.

Os requisitos de Software (ArcSWAT para ArcGIS versões 10.0 ou 10.1) incluem: Sistema operacional Microsoft Windows (e.g., XP, Windows 7, Server 2008) com o mais recente pacote de atualização do kernel; Microsoft .Net Framework 3.5; Adobe Reader versão 8 ou superior; ArcGIS: ArcView 10.0 com o Service Pack 5 (Build 4400) ou ArcView (Basic) 10.1 com o mais recente Service Pack e Extensão ArcGIS Spatial Analyst (ArcGIS versões 10.0 ou 10.1).

Não foram observadas na literatura referências aos requisitos computacionais relativos ao modelo MGB.

A abordagem denominada Unidade de Resposta Agrupada adotada pelo MGB reduz os requisitos relativos ao sistema computacional. Esta abordagem consiste em agrupar todas as áreas apresentando combinações de solo e cobertura do solo semelhantes, de modo que uma célula contenha um número limitado de Grupos de Resposta Hidrológica (GRU) distintos. O balanço hídrico da água no solo é computado para cada GRU e o escoamento gerado a partir de cada GRU é somado para encaminhamento para a rede fluvial (PANICONI; PUTTI, 2015). Além disso o modelo limita a quantidade de GRUs em 12. Esta abordagem tem sido utilizada por vários modelos hidrológicos de grande escala, como o VIC (WOOD et al., 1992; LIANG et al., 1994; NIJSSEM et al., 1997) e o WATFLOOD (SOULIS et al., 2004). O SWAT também utiliza a abordagem de unidade de resposta hidrológica, porém utiliza a sobreposição dos mapas de uso da terra, tipo de solo e declividade.

Ambos modelos oferecem opção de aplicação por meio de softwares gratuitos. As versões mais antigas do MGB utilizam o MapWindow GIS e as versões mais recentes o QGis, software em que a aplicação do SWAT também é possível. Além do QGis, o SWAT pode ser instalado no ArcGIS, software pago. Os códigos são livres e disponibilizados na linguagem FORTRAN. Alguns modeladores utilizam os códigos para rodar os modelos, uma vez que a identificação dos processos realizados em cada passo do menu e dos erros obtidos se torna mais fácil (LEWARNE, 2009).

As estruturas dos menus dos modelos são simples e intuitivas e seguem sequências lógicas de implementação. No SWAT as opções do menu ficam disponíveis na medida em que sua edição é possível. Porém, as mensagens de erro não são claras e o programa pode deixar de responder durante o processamento e a simulação, exigindo desligamento completo do computador. Em ambos os modelos é possível acompanhar de forma visual os resultados dos passos realizados.

A documentação e os manuais disponíveis são claros para ambos modelos, sendo possível buscar apoio em fóruns de discussão e conferências. Porém, por ser um modelo existente a mais tempo e mais conhecido, o SWAT possui uma maior diversidade de material disponível e os fóruns são mais ativos e organizados, sendo separados por módulos do modelo e regiões de aplicação.

Durante o desenvolvimento do trabalho houve grande dificuldade no entendimento da realização de alguns trabalhos anteriores, por não ficarem claras na literatura quais foram as simplificações realizadas, os valores de parâmetros adotados e as metodologias utilizadas. HUTTON et al. (2017) alertam para a necessidade de aumento da disponibilidade dos códigos e dados e da transparência na hidrologia computacional, uma vez que o resultado final de um estudo depende do código, do conjunto de dados e de uma ampla gama de escolhas feitas pelo modelador. Estas escolhas geralmente não são compartilhadas, o que acaba limitando a ciência, pelo fato de não ser possível identificar quais escolhas impactaram os resultados dos experimentos.

De forma facilitar a obtenção e a manipulação dos dados de entrada, ambos modelos permitem utilização de bases de dados disponíveis, sem necessidade de posterior manipulação.

Para aplicação do SWAT dados de clima relativos ao período de 1979 a 2014 podem ser obtidos do CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) para todas as partes do globo terrestre. O modelo possui em sua base interna dados relativos aos tipos de solo americanos.

O MGB possui em sua base interna as normais climáticas do INMET para o Brasil e dados de precipitação e vazão registrados por estações de monitoramento operadas pela ANA e disponíveis no Hidroweb. Além disso, o modelo aceita como entrada de dados de precipitação o formato de informações registradas para a América do Sul pelo satélite MERGE/CPTEC e pelo satélite global – TRMM. Os mapas de classe de resposta hidrológica podem ser obtidos utilizando o mapa de Unidades de Resposta Hidrológica da América do Sul com resolução 400m disponível no site do modelo MGB. São aceitos dados de clima obtidos através de base de dados interna de normais para o Brasil (INMET) e Climate REserarch Unit (CRU). Para todos os dados de entrada ainda existe a opção de entrada de dados externos, que devem estar compatíveis com os formatos exigidos pelo programa.

Para o preparo dos dados de entrada, ambos modelos disponibilizam programas auxiliares gratuitos, como o Super Manejo de Dados (FAN; COELHO, 2016) no MGB, que pode ser utilizado no gerenciamento dos dados de precipitação, vazão, clima e cota. A saída do programa fornece os dados de precipitação e vazão no formato a ser utilizado pelo modelo. Os programas auxiliares do SWAT estão relacionados com análise dos dados de saída, manejo dos dados de clima, entre outros. Entre os programas auxiliares disponíveis no modelo, destacam-se o “WGN Excel Macro” e o “pcpSTAT”, que calculam as estatísticas necessárias para o gerador climático.

5.2.1.4 As saídas requeridas foram atendidas?

As saídas dos modelos SWAT e MGB são todas na forma de arquivos de texto, vindos da era inicial de programação FORTRAN. Os resultados são apresentados por HRU ou por sub-bacia no SWAT e por sub-bacia no MGB. Ambos modelos apresentam os resultados dos cálculos dos principais processos hidrológicos envolvidos na modelagem. As unidades de medida dos modelos são padronizadas e documentadas em seus documentos teóricos, não permitindo flexibilidade no uso de unidades de medida que não correspondam ao seu próprio padrão.

É necessário conhecimento a respeito dos algoritmos utilizados em cada etapa dos vários processos contabilizados para avaliar como os modelos interpretam os dados de saída. Uma mais recente ferramenta do SWAT, SWAT-CHECK, auxilia na identificação de problemas ou previsões não usuais. Além disso, o programa fornece uma representação visual de várias saídas do modelo para ajudar os usuários iniciantes.

5.3 AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS MODELOS

5.3.1 Aspectos gerais e recomendação de modelo

A Tabela 14 apresenta alguns aspectos relacionados com as aplicações dos modelos, além de comparações. As comparações utilizaram como base as simulações realizadas na bacia do rio Itapemirim. Cabe observar que alguns aspectos citados podem se apresentar diferentes para outras aplicações. Por exemplo, o modelo MGB

fornece alguns dados para modelagens em bacias brasileiras. Caso as simulações forem realizadas em outras partes do mundo, dados equivalentes necessitarão ser levantados.

Tabela 14 – Aspectos gerais das aplicações dos modelos SWAT e MGB

	MGB	SWAT
Preparo da base de dados	É possível obter dados referentes a precipitação, vazão e clima na base interna do modelo.	Dados devem ser fornecidos pelo usuário.
Parâmetros calibráveis	15	286
Facilidade de implementação do modelo	Sequência lógica de implementação; apresenta valores médios sugeridos para os parâmetros fixos e calibráveis.	Sequência lógica de implementação; alguns parâmetros possuem valores pré-estabelecidos.
Mensagem de erro	Mensagens de erro genéricas.	Mensagens de erro genéricas. .
Equações utilizadas	Conceituais e físicas.	Empíricas e físicas.
Período de modelagem no presente estudo (1999-2013)	Rápido, cerca de 4 minutos.	50 minutos.
Análise dos resultados	Não possui programa específico para análise dos resultados.	SWAT-CHECK, avalia os resultados obtidos e indica os possíveis problemas e alertas.
Calibração no presente estudo (2002-2007)	Fácil de ser implementada; realizada dentro do próprio programa.	Calibração manual realizada dentro do próprio programa. Programa auxiliar SWAT-CUP para realização da calibração, validação, análise de sensibilidade e incertezas. 48 horas (300 iterações).
Comunidade de usuários	Possui um fórum disponível, porém não muito ativo.	Muito ativa, incluindo uma conferência anual e grupo de usuários online.
Trabalhos publicados	Desenvolvimento e aprimoramento do modelo; Previsões; Simulação continental; entre outros.	Desenvolvimento e aprimoramento do modelo; Previsões; Mudança de uso e manejo do solo; Mudanças climáticas; entre outros.
Escala de aplicação	Bacias de grande escala (continentais)	Bacias pequenas até bacias de larga escala e continentais
Locais de aplicação	Principalmente na América do Sul.	Todos os continentes.

Disponibilidade do código	Livre.	Livre.

5.4 SIMULAÇÕES HIDROLÓGICAS

5.4.1 Análise de sensibilidade

Segundo Beven (2001), um dos principais problemas relacionados com os modelos distribuídos está relacionado com excessivo número de parâmetros. Nash e Sutcliffe (1970), quando formularam o índice para análise de performance, apresentado anteriormente no presente documento, no capítulo 3.7, alertaram para o risco de modelos super parametrizados, isto é, modelos que utilizam parâmetros além dos necessários para bom desempenho do sistema e que podem aumentar a incerteza. De um ponto de vista teórico, modelos mais complexos e detalhados fisicamente representam melhor os processos que ocorrem na bacia, porém requerem maior quantidade de parâmetros e maior esforço de calibração, aumentando incertezas.

Perrin et al. (2001) argumenta que mais atenção deve ser dada à quantidade de parâmetros utilizados em modelos. O melhor modelo seria aquele que conseguisse gerar resultados mais próximos da realidade com menor quantidade de parâmetros e menos complexidade.

O SWAT é considerado um modelo rico em parâmetros, sendo necessária análise de sensibilidade para identificação dos parâmetros mais sensíveis. No presente estudo, a sensibilidade de cada parâmetro foi calculada a partir da avaliação de como alterações nos valores desse parâmetro geraram mudanças na função objetivo considerada, Nash- Sutcliffe. Quanto maior o t-stat, em valor absoluto, e menor o p-value, mais sensível é o parâmetro, sendo o p-value a principal estatística a ser avaliada (ABBASPOUR, 2015). Do total de 21 parâmetros avaliados na bacia do Itapemirim, apenas cinco apresentaram sensibilidades globais relevantes em termos da função objetivo, apresentando p-value menores que 0,005. Para variação dos valores dos parâmetros, o SWAT-CUP disponibiliza três métodos: substituição, adição de uma constante e multiplicação através da porcentagem de variação. As sensibilidades globais dos parâmetros referentes à variável vazão, calculada no SWAT-CUP na forma de valores estatísticos, são apresentadas na Figura 13 e na Tabela 15.

Figura 13 – Sensibilidade global dos parâmetros à vazão no SWAT

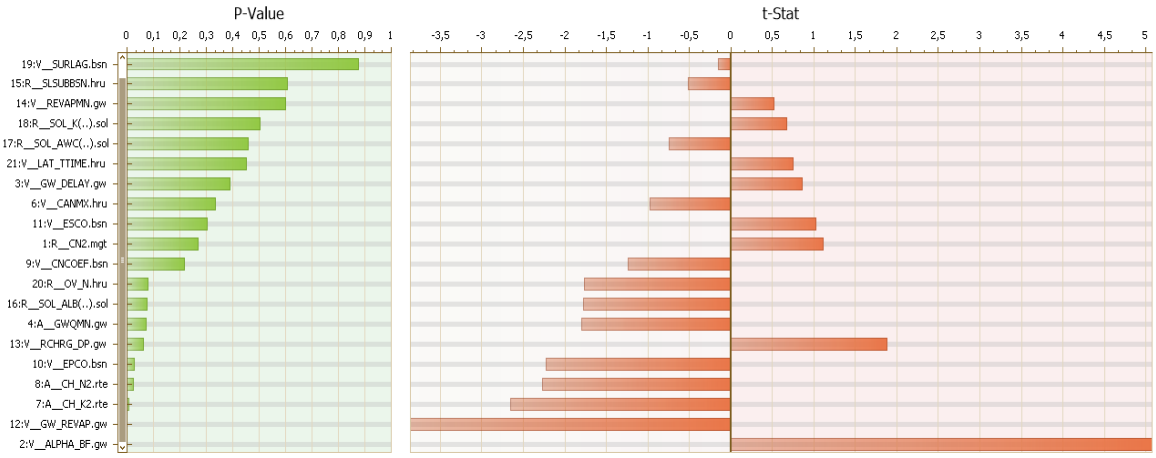


Tabela 15 – Sensibilidade global dos parâmetros à vazão no SWAT

Nome do parâmetro	t-Stat	p-Value
BIOMIX.mgt	0,10	0,92
SURLAG.bsn	-0,16	0,88
SLSUBBSN.hru	-0,51	0,61
REVAPMN.gw	0,52	0,60
SOL_K(..).sol	0,67	0,50
SOL_AWC(..).sol	-0,74	0,46
LAT_TTIME.hru	0,75	0,45
GW_DELAY.gw	0,86	0,39
CANMX.hru	-0,97	0,33
ESCO.bsn	1,03	0,30
CN2.mgt	1,11	0,27
CNCOEF.bsn	-1,24	0,22
OV_N.hru	-1,76	0,08
SOL_ALB(..).sol	-1,78	0,08
GWQMN.gw	-1,80	0,07
RCHRG_DP.gw	1,88	0,06
EPCO.bsn	-2,23	0,03
CH_N2.rte	-2,27	0,02
CH_K2.rte	-2,66	0,01
GW_REVAP.gw	-3,86	0,00
ALPHA_BF.gw	5,08	0,00

Dos cinco parâmetros considerados sensíveis pelo programa SUFI2, três estão relacionados com o escoamento subterrâneo: ALPHA_BF, GW-REVAP e EPCO. O primeiro está relacionado com a recessão do fluxo de base, o segundo é o coeficiente de ascensão da água à zona insaturada e o terceiro o fator de compensação da remoção de água pelas raízes. Os outros dois, CH_N2 e CH_K2 estão relacionados

aos fluxos nos canais, suas condutividades hidráulicas e o coeficiente de Manning no canal principal.

O modelo é considerado sensível às variações do parâmetro CN2 em muitos trabalhos (LIEW, ARNOLD e GARBRECHT, 2003; SAKKA, 2010; FUKUNAGA, 2012; CHENG et al., 2016; MOREIRA, 2017), porém no presente estudo ele não foi assim classificado. Isto ocorreu provavelmente pelo fato deste parâmetro ter sido anteriormente ajustado quando o SWAT-CHECK foi utilizado. Os parâmetros considerados mais sensíveis estão de acordo com as recomendações do manual elaborado por Neitsch et al. (2002) para a calibração do SWAT.

No MGB é possível alterar os valores de todos os parâmetros, porém Collischonn (2001), após análise da sensibilidade do modelo às variações nos parâmetros, os classificou como fixos ou calibráveis. Os parâmetros considerados fixos são aqueles que podem ter os valores medidos ou aqueles para os quais o modelo é pouco sensível às suas variações, enquanto os calibráveis são aqueles que são alterados em cada aplicação do modelo, buscando melhor ajuste. No presente trabalho foram considerados para a calibração apenas os parâmetros calibráveis.

5.4.2 Análise de desempenho dos modelos

As séries históricas de vazões diárias foram utilizadas para análise dos desempenhos dos modelos distribuídos SWAT e MGB. Com exceção dos dados de clima, foram considerados em ambos modelos dados de entrada semelhantes, porém com diferentes escalas espaciais de detalhamento. Para entendimento de suas limitações e vantagens, o SWAT, modelo amplamente utilizado no mundo, e o MGB, modelo em crescimento principalmente no Brasil, foram testados utilizando para comparações as vazões diárias registradas em sete estações fluviométricas localizadas dentro da bacia hidrográfica do Rio Itapemirim no período 1999-2013. Vazões para o período 1999 a 2001 foram utilizadas para inicialização dos modelos, enquanto que vazões para o período 2002 a 2007 foram utilizadas para calibração dos modelos. As vazões correspondentes ao período restante, 2008 a 2013, foram utilizadas para validação. O desempenho foi avaliado por meio de métodos quantitativos (estatísticos) e qualitativos (gráficos).

5.4.2.1 Calibração

5.4.2.1.1 Definição dos parâmetros

Os parâmetros identificados como sensíveis no SWAT foram calibrados com auxílio do SWAT-CUP. Os valores obtidos para estes parâmetros são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Valores dos parâmetros após a calibração com o SWAT-CUP

Parâmetro	Faixa de variação	Valor calibrado
CH_K2	0 - 130	26,13
ALPHA_BF	0 - 1	0,009
GW_REVAP	0,02 - 2	0,028
CH_N2	0 - 0,3	0,038
EPCO	0 - 1	0,047

O valor obtido após a calibração da condutividade hidráulica efetiva do canal (CH_K2), 26,13 mm h^{-1}, foi próximo aos estimados por Fukunaga (2012) para uma sub-bacia do rio Itapemirim (35,2 mm h^{-1}), e por Narsimlu et al. (2015) (27,84 mm h^{-1}) na calibração de uma bacia na Índia. O valor calibrado do coeficiente de rugosidade de Manning para o canal (CH_N2) foi 0,038 s/m^3. Oliveira (2014), Pereira (2013) e Fukunaga (2012) obtiveram coeficiente de rugosidade do canal 0,087 s/m3, 0,012 s/m3, e 0,023 s/m3 respectivamente, para bacias localizadas em Aracruz (ES), Minas Gerais e Espirito Santo. O valor obtido para a bacia do rio Itapemirim está dentro da faixa de valor, que, segundo Chow (1959) apud Neitsch et al. (2010), representa canais naturais com alguns obstáculos como árvores, pedras e mato.

Para a constante de recessão do escoamento de base (ALPHA_BF), foi utilizado o valor 0,009, próximo ao adotado por Salles (2012), 0,01, na calibração da bacia do ribeirão Pipiripau, no Distrito Federal e Pinto (2011), 0,012, em seu trabalho na bacia da Serra da Mantiqueira, Minas Gerais. O Coeficiente de retorno de água do aquífero raso para a zona radicular (GW_REVAP) após calibração foi 0,038, próximo ao valor inicial padrão (0,02) do modelo, porém distante do valor obtido por Fukunaga (2012) (0,188).

EPCO é o fator de compensação de absorção da planta quando o teor de umidade do solo está baixo. À medida que este parâmetro se aproxima de zero, o modelo permite uma menor variação da absorção de água das camadas inferiores para camadas

superiores no perfil do solo para satisfazer a absorção em potencial (ARNOLD et al., 2012). O ajuste deste parâmetro (0,047) ficou dentro dos limites ajustados por Asadzadeh et al. (2016), Bell (2015), Cheng et al. (2016) e Romagnoli et al. (2017).

Para as condições do presente estudo, o MGB se mostrou sensível às variações dos parâmetros: capacidade de armazenamento de água no solo (Wm); relação entre armazenamento e saturação (b); coeficiente de controle do escoamento subterrâneo (Kbas) e parâmetro de correção do tempo de concentração para drenagem superficial (CS).

Os parâmetros CAP, WC e QB não foram modificados para qualquer sub-bacia. CAP está relacionado à ascensão capilar, água do reservatório subterrâneo que retorna ao solo, WC é a fração de Wm abaixo da qual não há geração de escoamentos subterrâneo e sub-superficial e QB está associado à condição inicial do modelo. As tabelas com os valores calibrados do MGB são apresentados no Anexo D.

5.4.2.1.2 Resultados das simulações para o período de calibração

As Tabelas 17 e 18 apresentam os valores médios, máximos e mínimos para cada ano do período de calibração, considerando um passo de tempo diário, para as bacias delimitadas pelas estações 57370000 e 57580000, com áreas de drenagem 566 e 5.170 Km^2 respectivamente. Nas Figuras 14 e 15 é possível comparar graficamente o comportamento das valores médios, máximos e mínimos observados e simulados pelos modelos SWAT e MGB para estas estações.

Tabela 17 – Média, máximo e mínimo das vazões diárias (m³/s) e erro médio para cada ano do período de calibração na sub-bacia relativa ao posto 57370000.

57370000 - Terra Corrida Montante															
Ano	**Média**					**Máximo**					**Mínimo**				
	Obs.	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**
2002	13,12	12,53	-4,49%	14,48	10,40%	76,35	84,76	11,02%	91,41	19,73%	3,92	4,15	5,94%	3,86	-1,47%
2003	10,59	10,51	-0,77%	10,25	-3,15%	108,51	110,60	1,93%	109,20	0,64%	3,36	3,85	14,49%	1,66	-50,58%
2004	12,42	13,06	5,19%	15,08	21,47%	106,14	133,50	25,78%	133,22	25,51%	3,73	3,73	0,05%	2,80	-25,03%
2005	14,51	13,34	-8,08%	14,87	2,47%	81,09	81,74	0,80%	96,82	19,39%	4,70	4,27	-9,15%	4,12	-12,23%
2006	10,87	9,02	-16,99%	9,88	-9,09%	111,72	76,87	-31,19%	94,57	-15,35%	4,31	3,61	-16,36%	2,80	-35,08%
2007	12,46	11,64	-6,62%	12,85	3,13%	73,71	67,48	-8,45%	84,83	15,09%	3,92	3,91	-0,20%	2,44	-37,84%
Erro médio	**-**	**-**	**7,02%**	**-**	**8,29%**	**-**	**-**	**13,2%**	**-**	**16,0%**	**-**	**-**	**7,7%**	**-**	**27,0%**

Figura 14 – Comparação das vazões médias, máximas e mínimas observadas e simuladas pelos modelos- Estação fluviométrica 57370000 - Período de calibração

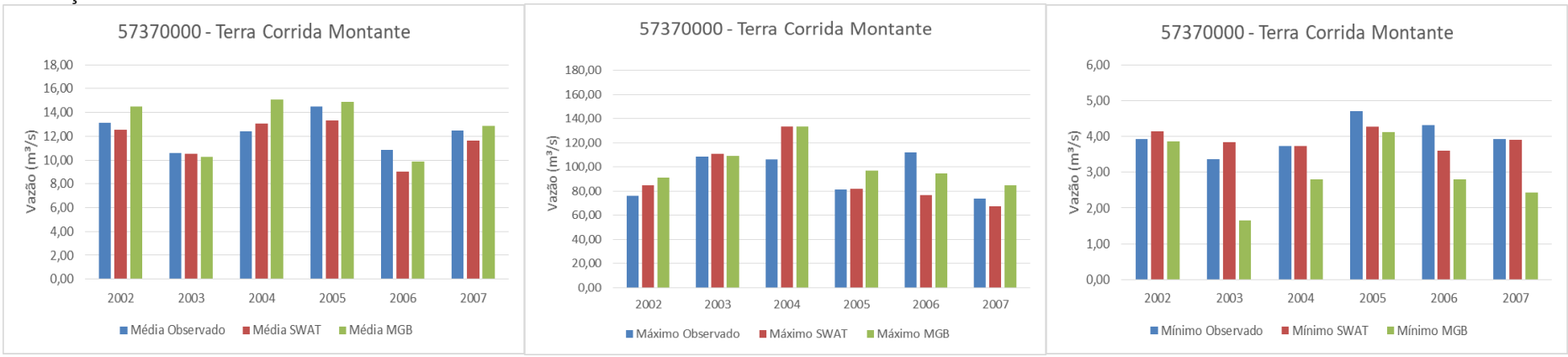
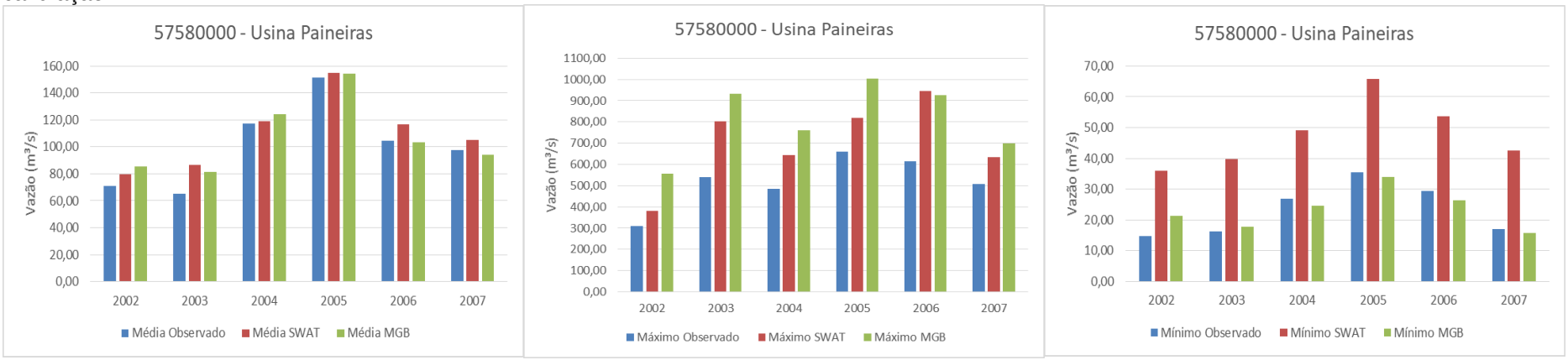


Tabela 18 – Média, máximo e mínimo das vazões diárias (m³/s) e erro médio para cada ano do período de calibração na sub-bacia relativa ao posto 57580000.

57580000 - Usina Paineiras															
Ano	**Média**					**Máximo**					**Mínimo**				
	Obs.	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**
2002	70,81	79,48	12,25%	85,71	21,04%	310,83	380,20	22,32%	554,80	78,49%	14,75	35,86	143,12%	21,40	45,11%
2003	65,45	86,40	32,02%	81,44	24,44%	538,39	802,70	49,09%	932,06	73,12%	16,19	39,84	146,08%	17,71	9,37%
2004	117,52	118,82	1,11%	124,18	5,67%	486,10	644,30	32,54%	760,93	56,54%	26,96	49,24	82,64%	24,69	-8,44%
2005	151,23	154,66	2,27%	154,08	1,88%	661,51	818,90	23,79%	1002,40	51,53%	35,42	65,84	85,88%	33,97	-4,11%
2006	104,36	116,43	11,56%	103,25	-1,07%	615,68	944,50	53,41%	926,08	50,42%	29,49	53,63	81,86%	26,34	-10,69%
2007	97,32	104,86	7,75%	93,97	-3,44%	507,98	635,20	25,04%	698,67	37,54%	17,10	42,50	148,54%	15,66	-8,43%
Erro médio	**-**	**-**	**11,16%**	**-**	**9,59%**	**-**	**-**	**34,4%**	**-**	**57,9%**	**-**	**-**	**114,7%**	**-**	**14,4%**

Figura 15 – Comparação das vazões médias, máximas e mínimas observadas e simuladas pelos modelos- Estação fluviométrica 57580000 - Período de calibração



Para o posto 57370000, quanto às vazões médias anuais, as médias dos módulos dos erros percentuais corresponderam a 7,0% para o SWAT e 8,3% para o MGB. Os maiores erros, para os modelos SWAT e MGB foram 32,0% (2003) e 24,4% (2003), respectivamente. Desta forma, as médias dos módulos dos erros e os máximos erros correspondentes aos dois modelos foram relativamente próximos.

Quanto às vazões diárias máximas anuais, as médias dos módulos dos erros percentuais corresponderam a 13,2% para o SWAT e 16,0% para o MGB. Os maiores erros, para os modelos SWAT e MGB foram 31,2% (2006) e 25,5% (2004), respectivamente. Desta forma, as médias dos módulos dos erros e os máximos erros correspondentes aos dois modelos foram relativamente próximos.

Quanto às vazões diárias mínimas anuais, as médias dos módulos dos erros percentuais corresponderam a 7,7% para o SWAT e 27,0% para o MGB. Os maiores erros, para os modelos SWAT e MGB foram 16,4% (2006) e 50,6% (2003), respectivamente. Desta forma, as médias dos módulos dos erros e os máximos erros relativos ao modelo MGB foram muito superiores aos correspondentes ao SWAT.

Na comparação entre as vazões diárias mínimas simuladas pelos modelos SWAT e MGB, para os anos 2002 a 2007, período de calibração, pode ser observado que, com exceção do ano de 2002, os erros percentuais correspondentes ao MGB foram muito superiores.

Em síntese, relativamente ao posto 57370000, considerando os resultados relativos aos erros percentuais, pode ser observado que os erros percentuais relativos às estimativas das vazões médias e máximas anuais obtidas por meio de simulações com o SWAT e MGB, para o período de calibração, se apresentaram próximas. Quanto aos erros percentuais relativos às estimativas de vazões mínimas anuais, os correspondentes ao MGB foram muito superiores aos relativos ao SWAT.

Para o posto 57580000, quanto às vazões médias anuais, as médias dos módulos dos erros percentuais corresponderam a 11,2% para o SWAT e 9,6% para o MGB. Os maiores erros, para os dois modelos foram os relativos ao ano 2003, sendo 32,0% para o SWAT e 24,4% para o MGB. Desta forma, as médias dos módulos dos erros e os máximos erros correspondentes aos dois modelos foram relativamente próximos.

Na comparação entre as vazões médias diárias simuladas pelos modelos SWAT e MGB, para os anos 2002 a 2007, período de calibração, pode ser observado que para

4 (quatro) dos 6 (seis) anos, 2003, 2005, 2006 e 2007, os erros percentuais correspondentes ao SWAT foram superiores.

Quanto às vazões diárias máximas anuais, as médias dos módulos dos erros percentuais corresponderam a 34,4% para o SWAT e 57,9% para o MGB. Os maiores erros, para os modelos SWAT e MGB foram 53,4% (2006) e 78,5% (2002), respectivamente. Desta forma, as médias dos módulos dos erros e os máximos erros relativos ao modelo MGB foram muito superiores aos correspondentes ao SWAT.

Na comparação entre as vazões diárias máximas anuais simuladas pelos modelos SWAT e MGB, para os anos 2002 a 2007, período de calibração, pode ser observado que apenas para o ano 2006 o erro percentual correspondente ao MGB (50,42%) foi inferior ao relativo ao SWAT (53,41%).

Quanto às vazões diárias mínimas anuais, as médias dos módulos dos erros percentuais corresponderam a 114,7% para o SWAT e 14,4% para o MGB. Os maiores erros, para os modelos SWAT e MGB foram 146,1% (2003) e 45,08% (2002), respectivamente. Desta forma, as médias dos módulos dos erros e os máximos erros relativos ao modelo SWAT foram muito superiores aos correspondentes ao MGB.

Na comparação entre as vazões diárias mínimas simuladas pelos modelos SWAT e MGB, para os anos 2002 a 2007, período de calibração, pode ser observado que para todos os 6 (seis) anos os erros percentuais correspondentes ao SWAT foram muito superiores.

Em síntese, relativamente ao posto 57580000, considerando os resultados relativos aos erros percentuais, pode ser observado que os erros percentuais relativos às estimativas das vazões médias anuais obtidas por meio de simulações com o SWAT e MGB, para o período de calibração, se apresentaram próximos. Quanto aos erros percentuais relativos às estimativas de vazões máximas anuais, os correspondentes ao MGB foram muito superiores aos relativos ao SWAT. Ao contrário, quanto aos erros percentuais relativos às estimativas de vazões mínimas anuais, os correspondentes ao SWAT foram muito superiores aos relativos ao MGB.

No Anexo E são apresentadas as tabelas e os gráficos equivalentes às Tabelas 17 e 18 e Figuras 14 e 15, correspondentes às outras 5(cinco) seções de controle.

A Tabela 19 mostra as médias dos erros percentuais anuais, relativas aos modelos SWAT e MGB, correspondentes às vazões médias, máximas e mínimas anuais, para o período de calibração.

Tabela 19 - Erros médios percentuais, relativos às vazões médias, máximas e mínimas anuais, o período de calibração

Posto	Vazões médias (SWAT)	Vazões Médias (MGB)	Vazões Máximas (SWAT)	Vazões Máximas (MGB)	Vazões Mínimas (SWAT)	Vazões Mínimas (MGB)
57370000	7,0	8,3*	13,2	16,0*	7,7	27,0*
57580000	11,2	9,6	34,4	57,3*	114,7	14,4
57400000	5,5	19,0*	33,7	38,7*	40,0	15,0
57420000	22,1	11,2	28,9	18,2	18,3	36,7*
57450000	5,5	14,5*	19,4	14,9	47,6	26,1
57490000	4,8	11,9*	26,8	20,6	136,5	48,5
57550000	13,5	13,2	28,7	14,6	138,3	23,0
Média	9,9	12,5*	26,4	25,8	71,9	27,2
Máxima	22,1	19,0	34,4	57,3*	138,3	48,5

*Erros percentuais maiores para o MGB, em comparação com os correspondentes para o SWAT.

Quanto aos períodos de calibração, os erros percentuais relativos às vazões médias, máximas e mínimas, para o MGB foram superiores aos correspondentes para o SWAT para 4(quatro), 3(três) e 2(dois) dos 7(sete) postos fluviométricos considerados. Cabe observar que as médias dos erros percentuais calculadas considerando os 7(sete) postos relativos ao MGB foram próximos às do SWAT para as vazões médias, sendo superiores para as vazões máximas e inferiores para as vazões médias.

As estatísticas de calibração dos modelos, considerando fluxos observados e simulados, são apresentadas na Tabela 20. A calibração foi direcionada de forma a obter melhores valores para os índices estatísticos utilizados. Considerou-se que um modelo apresenta bom desempenho se os valores de RMSE forem menores do que a metade do desvio padrão observado, R2 e NSE estiverem próximos da unidade e PBIAS possuírem valores pequenos. Segundo Moriasi et al. (2015), um modelo é considerado calibrado para vazões se NSE > 0,5, PBIAS entre -15% e +15% e R2 > 0,6. Quando o objetivo é a comparação entre dois ou mais modelos, indicadores como o erro médio quadrático (RMSE) e percentagem bias (PBIAS) também são recomendados (KHERDE, 2016).

Tabela 20 – Valores das estatísticas de precisão para cada um dos pontos de controle resultantes da aplicação dos modelos na simulação hidrológica da bacia do rio Itapemirim, no período de calibração.

	R2		NSE		NSElog		Pbias		RMSE		(σObs)/2
	SWAT	MGB	SWAT	MGB	SWAT	MGB	SWAT	MGB	SWAT	MGB	
57370000	0,75	0,88	0,72	0,81	0,68	0,76	-5	5	5,91*	4,81	5,59
57400000	0,82	0,87	0,78	0,73	0,83	0,85	0	9	8,18	9,12	8,78
57420000	0,59	0,70	0,55	0,62	0,80	0,80	-23*	2	12,87*	11,96*	9,64
57450000	0,82	0,88	0,81	0,87	0,87	0,85	-6	2	25,72	21,41	29,07
57490000	0,74	0,87	0,67	0,83	0,75	0,85	-16*	8	10,70*	7,52	9,23
57550000	0,73	0,85	0,72	0,80	0,67	0,86	12	10	13,36*	11,30	12,58
57580000	0,68	0,79	0,67	0,70	0,73	0,84	9	6	54,79*	52,07*	47,28

Pbias: percentagem bias; NSE: coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; NSElog; logaritmo do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; RMSE: erro médio quadrático; σ_{Obs}: desvio padrão observado.
* Valores fora dos limites propostos.

Considerando o critério sugerido por Moriasi et al. (2015) e os resultados relativos aos parâmetros estatísticos NSE, R2 e NSElog, os modelos SWAT e MGB simularam de forma satisfatória as vazões das sub-bacias do rio Itapemirim, para o período de calibração, sendo que o MGB apresentou melhores resultados relativos aos parâmetros estatísticos.

Os valores de R2, para o período de calibração do SWAT se situaram entre 0,68, para a estação 57580000 (Usina Paineiras) e 0,82, para as estações 57400000 e 57450000 (Rive). Para o período de calibração do MGB, os valores de R2 variaram entre 0,70, para a estação 57420000 e 0,88, para a estação 57370000 (Terra Corrida Montante) e 57450000 (Rive).

Quanto aos valores de NSE do SWAT, os valores se situaram entre 0,55, para a estação 57420000 (Ibitirama) e 0,81, para a estação 57450000 (Rive), enquanto para o MGB, os valores de NSE variaram entre 0,62, para a estação 57420000 e 0,87, para a estação 57450000.

Os valores de NSElog se situaram entre 0,67, para a estação 57550000 e 0,87, para a estação 57450000. Enquanto para o mesmo período, no MGB, os valores de NSElog variaram entre 0,76, para a estação 57370000 e 0,86, para a estação 57550000.

Quanto aos valores de Pbias, para o período de calibração do SWAT, os valores se situaram entre -23, para a estação 57420000 e zero, para a estação 57400000. Para o período de calibração do MGB, os valores de Pbias variaram entre 10, para a estação 57550000 e 2, para as estações 57420000 e 57450000.

Os valores de RMSE devem ser analisados juntamente com o desvio padrão dos dados observados. Para o período de calibração do SWAT, o erro médio foi até 34% maior que a metade do desvio padrão observados (estação 57420000), enquanto para o MGB foi até 26% menor. As estações 57420000 e 575880000 apresentaram erros maiores que o recomendado para ambos modelos.

Segundo os critérios de Moriasi et al. (2012), os postos 57400000 e 57450000, quanto à calibração, foram os que apresentaram todas as estatísticas conformes. Para as estações 57370000 e 57550000, apenas os valores relativos ao RMSE correspondentes à modelagem com o SWAT se apresentaram não conformes. Para a estação 57420000, apenas os valores de Pbias e RMSE correspondentes ao SWAT e de RMSE correspondente ao MGB se apresentaram não-conformes. Para a estação 57490000 apenas os valores de Pbias e RMSE correspondentes à modelagem com o SWAT se apresentaram não-conformes. Quanto à estação 57580000, apenas os valores do RMSE correspondentes aos dois modelos se apresentaram não-conformes. Excetuando-se estação, todas apresentaram valores de RMSE fora dos limites estabelecidos.

Considerando-se os valores da estatística R2, NSE e NSElog, todos os valores, para todas as estações, para ambos os modelos, se apresentaram conformes. Quanto ao Pbias, todos os valores, para todas as estações, para o modelo MGB, se apresentaram conformes, enquanto que para o modelo SWAT, os valores correspondentes às estações 57420000 e 57490000 se apresentaram não-conformes. Relativamente o RMSE, para a modelagem com o SWAT, valores correspondentes a 5(cinco) estações (57370000, 57420000,57490000, 5755000 e 57580000) se apresentaram não conformes, enquanto para a modelagem com o MGB valores correspondentes a 2(duas) estações, 57420000 e 57580000 se apresentaram não-conformes.

Na Tabela 21 são apresentadas as estatísticas de precisão calculadas seguindo recomendação de Monteiro (2016), utilizando médias ponderadas de cada parâmetro estatístico, considerando as frações da área de drenagem correspondentes a cada estação fluviométrica. Para estações a jusante, as áreas de drenagem correspondentes às estações localizadas a montante foram subtraídas da área total. As médias simples dos parâmetros estatísticos também são apresentadas. Com isso

é possível perceber que a diferença entre os métodos de representação é pouco representativa, ficando inalterada em alguns casos.

Tabela 21 – Estatísticas de precisão resultantes da aplicação dos modelos na simulação hidrológica na bacia do rio Itapemirim, para período de calibração

	R2		NSE		NSElog	
	SWAT	**MGB**	**SWAT**	**MGB**	**SWAT**	**MGB**
Médias ponderadas considerando áreas de drenagem para cada ponto.	0,73	0,84	0,70	0,77	0,76	0,83
Médias simples.	0,63	0,80	0,59	0,77	0,60	0,80

Para o período de calibração do SWAT, o valor médio ponderado de R2 foi 0,73, enquanto o do NSE foi 0,70. Perazzoli (2012) obteve para período de calibração NSE = 0,77 em uma bacia hidrográfica do ribeirão Concórdia (30,74 km²), no sul do Brasil. Fukunaga (2012), também para período de calibração, obteve valores de R2 e NSE iguais a 0,76 e 0,75, respectivamente para uma sub-bacia do rio Itapemirim de aproximadamente 2.237 km^2. Moriasi et al. (2015) sugere para os dois índices, R2 e NSE, valores mínimos 0,6 e 0,5, respectivamente. Thampi et al. (2010) obtiveram NSE = 0,66 para simulações com passo de tempo anual em bacias tropicais úmidas na Índia. Teixeira (2017) obteve valores 0,38 para o NSE e R2 na calibração de uma microbacia hidrográfica experimental do Mangaraí (164 Km²), localizada no Espirito Santo.

Para o período de calibração com o MGB, os valores médios ponderados dos índices R2 e NSE corresponderam a 0,84 e 0,77, respectivamente, superiores aos obtidos para o SWAT. Paiva, Collischonn e Buarque (2011) obtiveram valores médios de NSE = 0,56 para a calibração do modelo MGB na bacia do rio Solimões na Amazônia (2.221.990km^2). Siqueira et al. (2018) obtiveram índices NSE superiores a 0,6 para 55% dos casos de calibração no sub-continente América do Sul.

As figuras 16, 17 e 18 apresentam a distribuição espacial das estatísticas de precisão NSE, R2 e logNSE para o período de calibração (2002-2007). Nas figuras 19 a 22, é possível comparar graficamente o comportamento das vazões simuladas pelos modelos SWAT e MGB em relação às vazões observadas em monitoramento nas estações 57370000 e 57580000. Os gráficos relativos às demais estações são apresentados no Anexo F.

No Anexo G são apresentados os gráficos de correlação dos valores simulados pelos modelos com os dados observados. Por meio da análise do comportamento da linha de tendência linear e do coeficiente de determinação (R^2) é possível perceber que, com exceção do ponto de monitoramento 57420000 na simulação com o SWAT, todos os outros apresentaram, boa correlação entre as vazões estimadas e monitoradas no período de calibração considerando o critério de Moriasi (2015). Esta mesma estação apresentou, resultados satisfatórios no MGB, sendo que os outros postos apresentaram resultados considerados bons ou muito bons.

Um ajuste perfeito requer que o coeficiente angular da reta e o coeficiente linear sejam iguais a 1 e 0, respectivamente, indicando equivalência entre os valores simulados pelo modelo e os observados. Em geral os coeficientes angulares das retas apresentaram qualidades de ajuste razoáveis (inclinações próximas a 1), com exceção dos pontos de monitoramento 57420000, para ambos modelos, e 57490000 para o SWAT, sendo que na maioria dos casos os coeficientes foram melhores para o MGB. Os coeficientes lineares também foram melhores para o MGB, apresentando valores mais próximos de zero.

Figura 16 – Desempenho dos modelos SWAT e MGB em termos de R2 durante o período de calibração

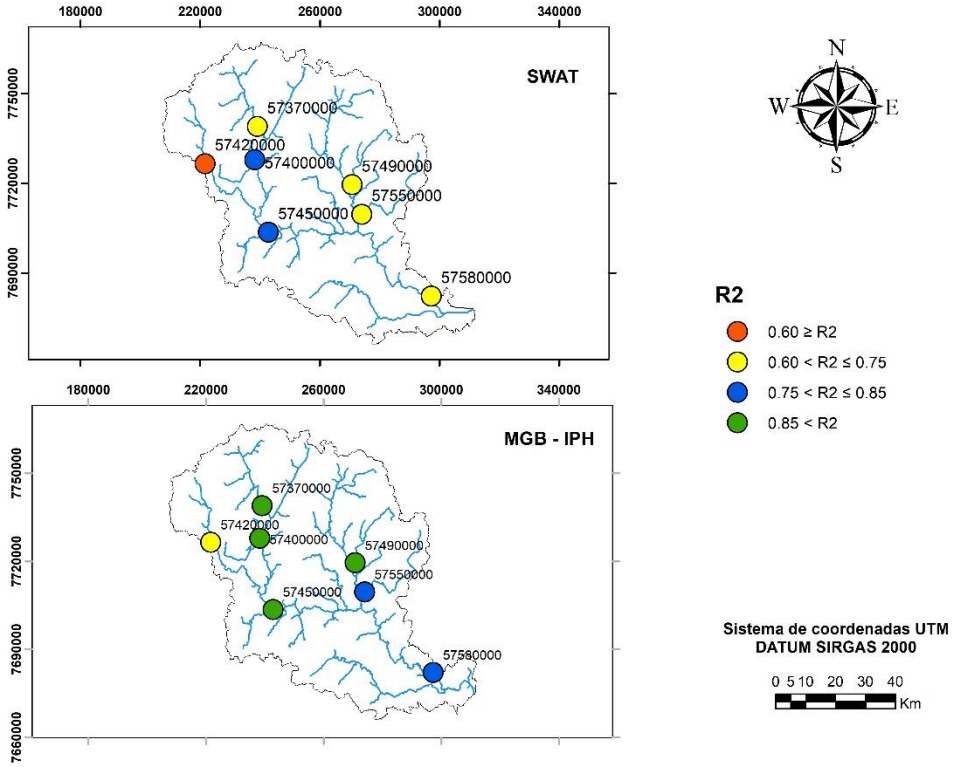


Figura 17 – Desempenho dos modelos SWAT e MGB em termos de NSE durante o período de calibração

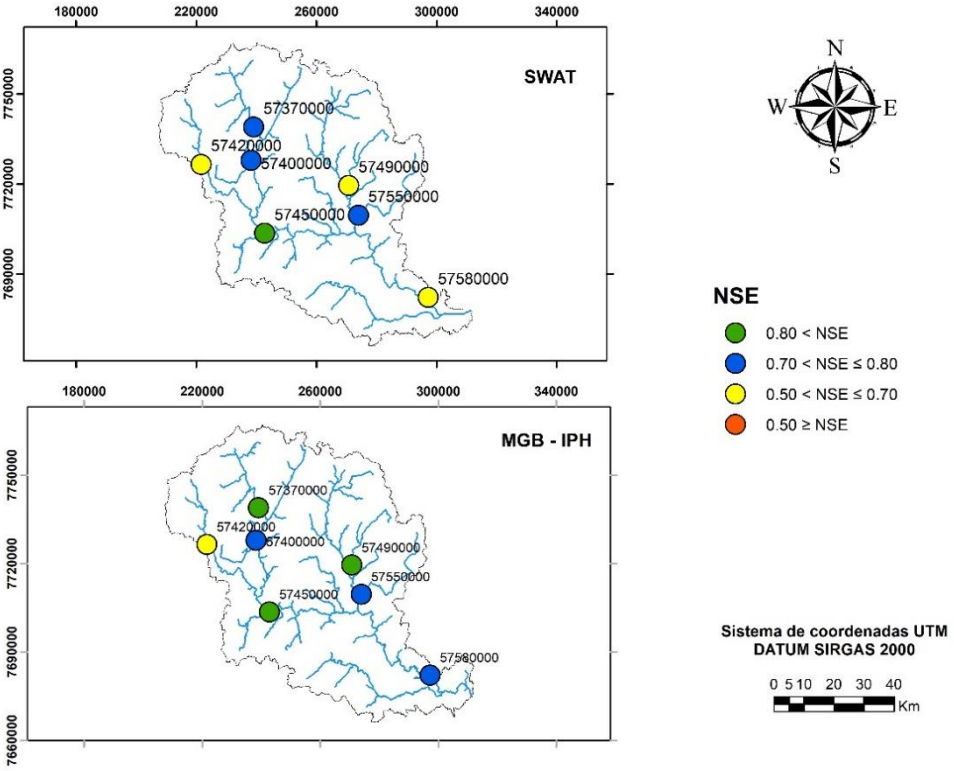


Figura 18 – Desempenho dos modelos SWAT e MGB em termos de logNSE durante o período de calibração

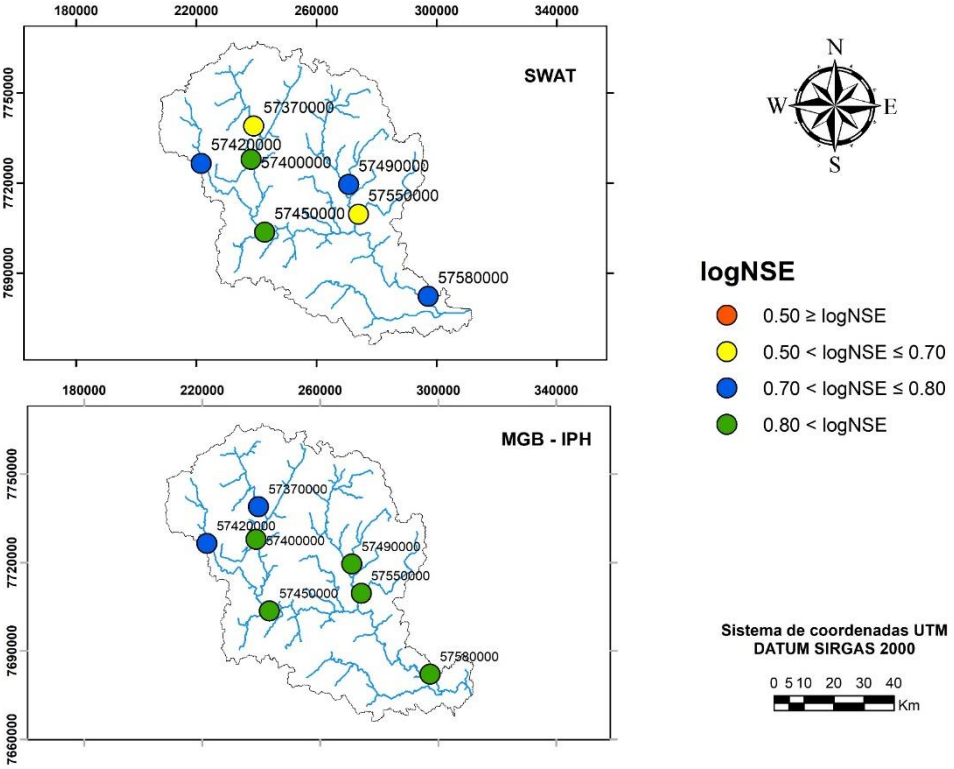
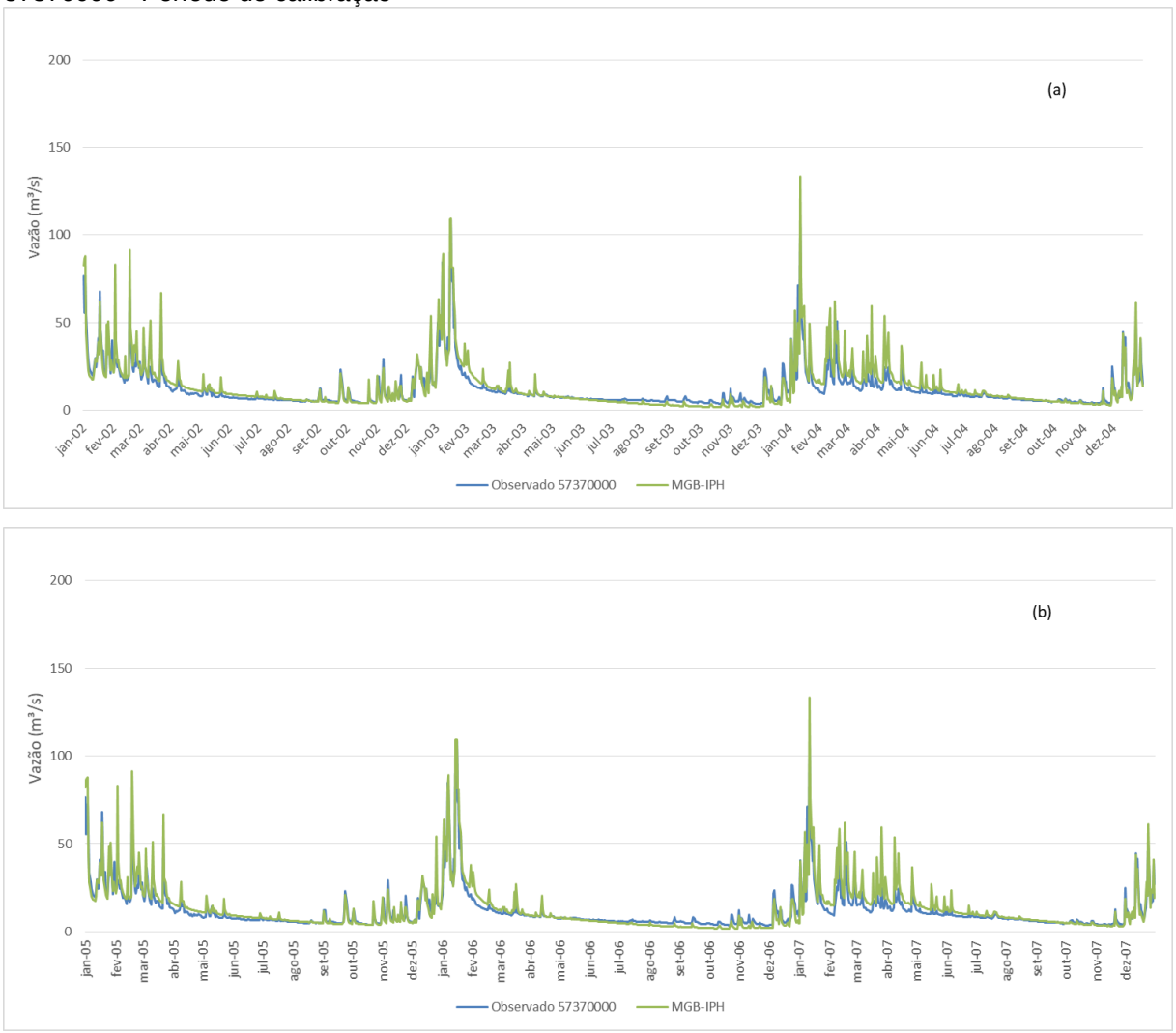
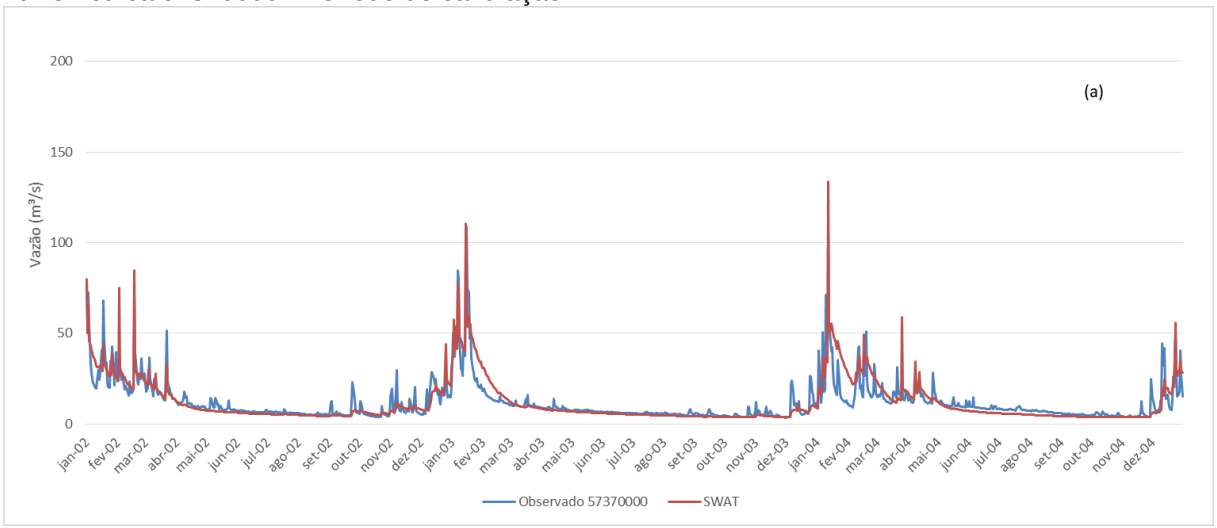


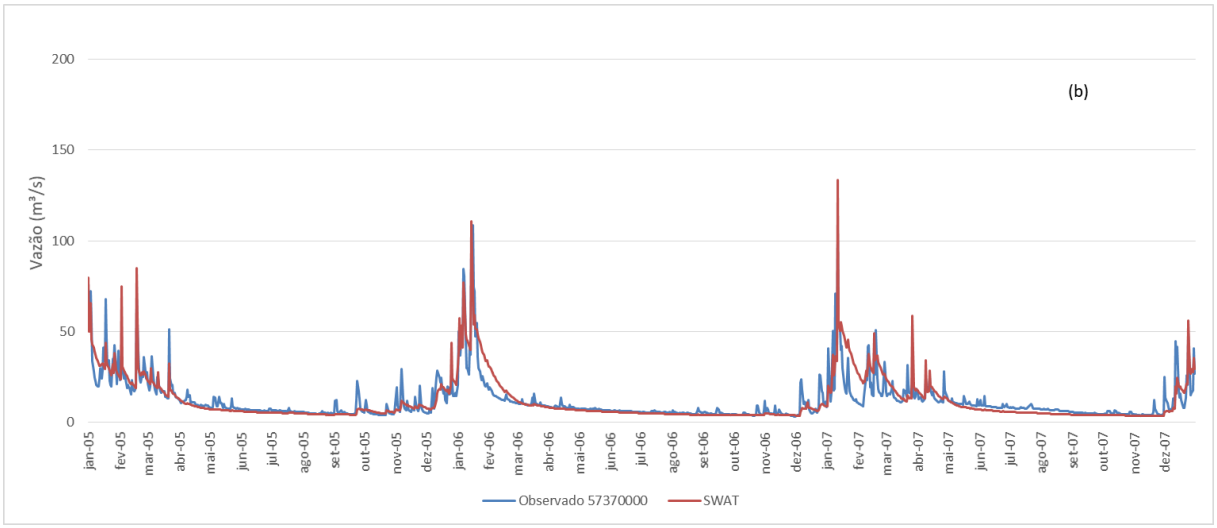
Figura 19 – Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo MGB - Estação fluviométrica 57370000 - Período de calibração



Fonte: o autor.

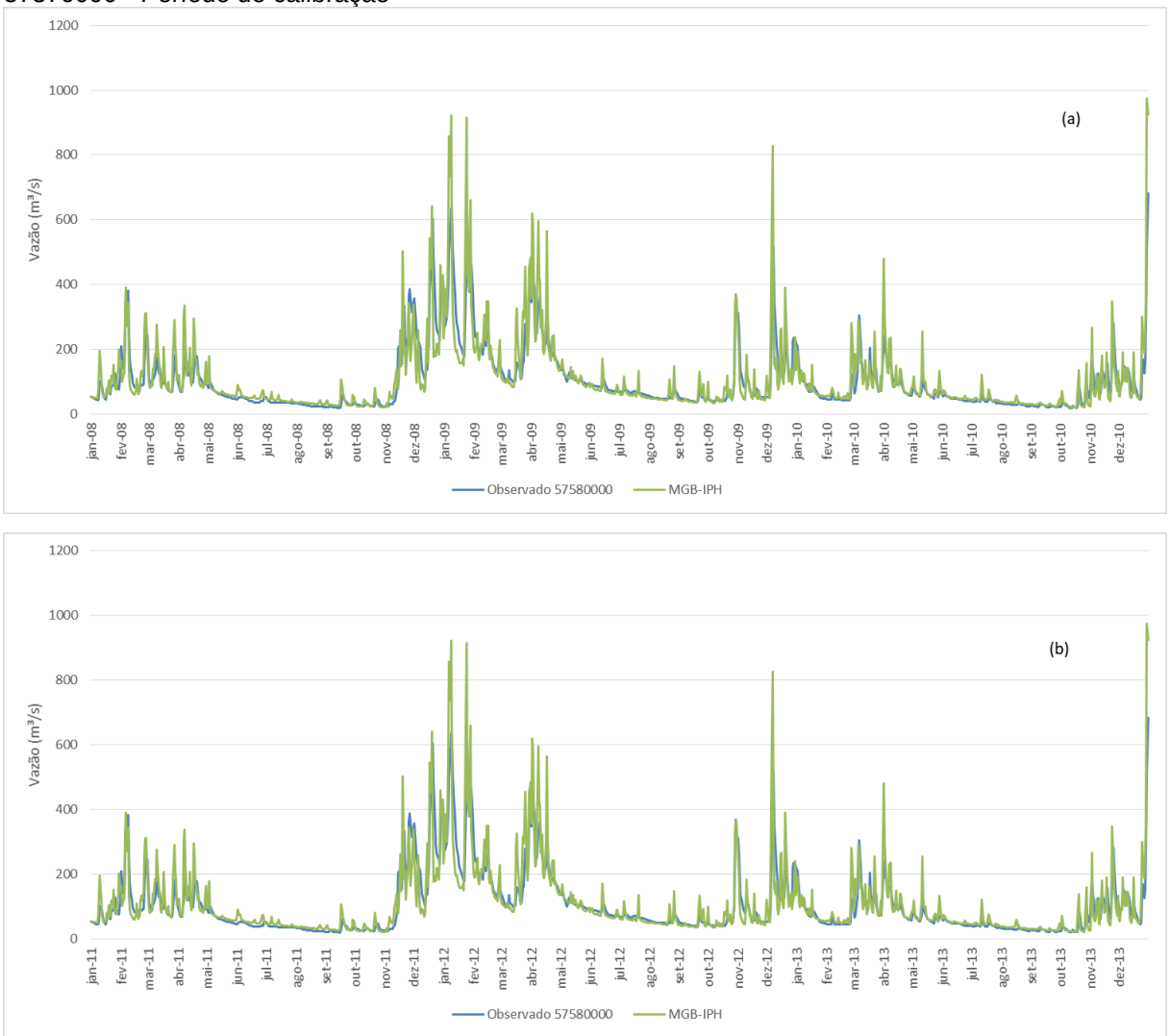
Figura 20 – Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo SWAT - Estação fluviométrica 57370000 - Período de calibração





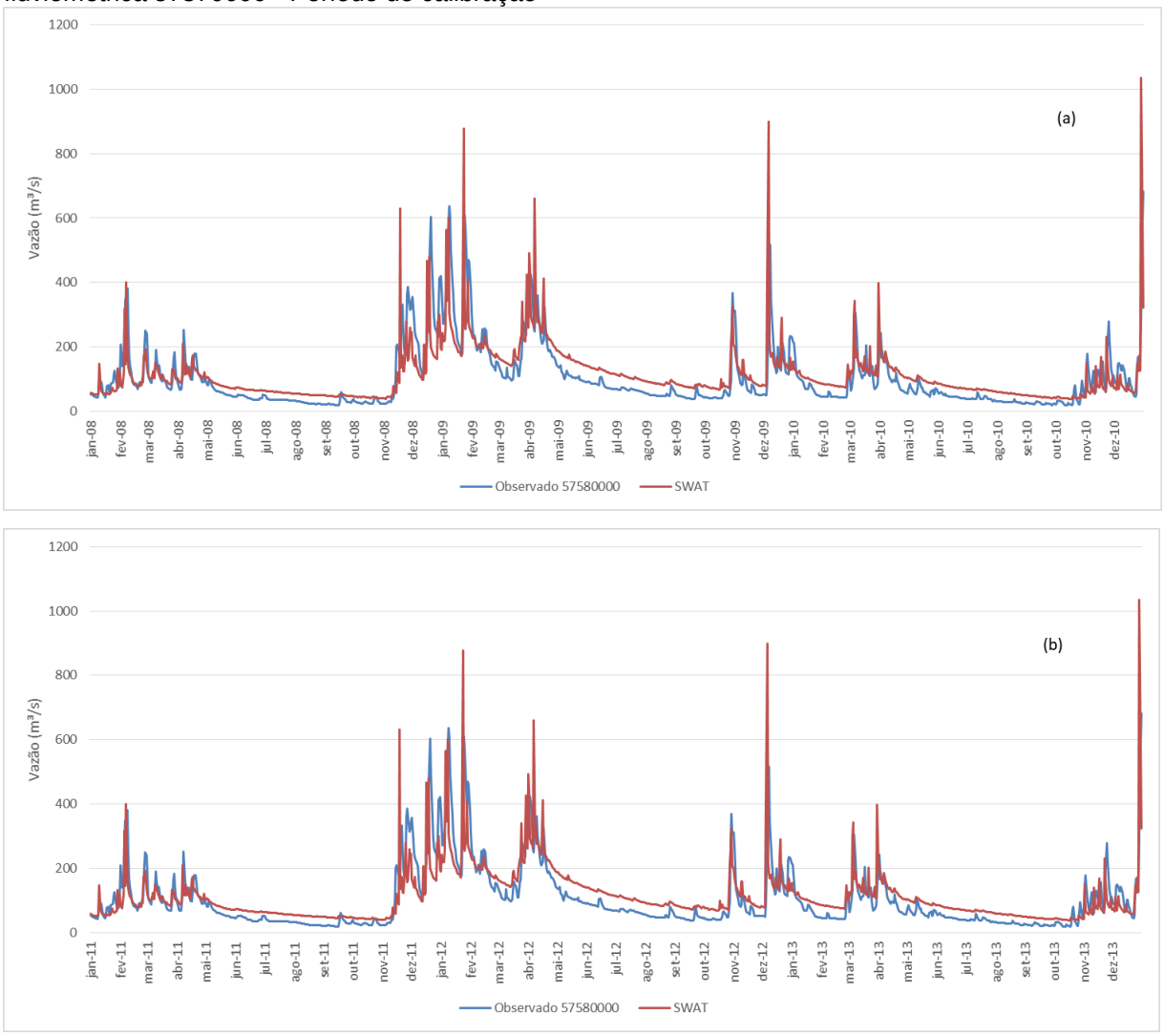
Fonte: o autor.

Figura 21 – Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo MGB - Estação fluviométrica 57370000 - Período de calibração



Fonte: o autor.

Figura 22 – Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo SWAT - Estação fluviométrica 57370000 - Período de calibração



Fonte: o autor.

Relativamente ao critério de classificação proposto por Moriasi et al. (2015), para o índice NSE, tanto para o SWAT como para o MGB, as classes foram “satisfatória”, “boa” e “muito boa”. Quando o R2 foi considerado, o SWAT apresentou classe “insatisfatória” para a estação 57420000 e “satisfatória” e “boa” para as demais, enquanto para o MGB foram “satisfatória”, “boa” e “muito boa”. Para o NSElog o SWAT apresentou classes “satisfatória”, “boa” e “muito boa”, enquanto o MGB, “boa” e “muito boa”.

Em geral, para o MGB foram obtidos valores de NSE e logNSE mais próximos de 1, considerando o período de calibração, para todas as estações de controle. Cabe observar que o coeficiente NSE possui maior sensibilidade a valores extremos enquanto o NSElog possui maior sensibilidade a vazões mínimas. Valores próximos

da unidade indicam simulação adequada de períodos de recessão de hidrograma e estiagens.

5.4.2.2 Validação

5.4.2.2.1 Resultados das simulações para o período de validação

A etapa de validação foi realizada após a calibração ser considerada satisfatória, segundo os critérios de Moriasi (2015) para NSE. De acordo com Arabi et al. (2007) a etapa de validação permite confirmar a acurácia do modelo visando à simulação de processos em bacias hidrográficas com monitoramento hidrológico. As tabelas 22 e 23 apresentam os valores médios, máximos e mínimos para cada ano do período de validação, considerando um passo de tempo diário, para as bacias delimitadas pelas estações 57370000 e 57580000. Nas figuras 23 e 24, é possível comparar graficamente o comportamento das valores médios, máximos e mínimos observados e simuladas pelos modelos SWAT e MGB para estas estações.

Tabela 22 – Média, máximo e mínimo das vazões diárias (m³/s) e erro médio para cada ano do período de validação na sub-bacia relativa ao posto 57370000.

57370000 - Terra Corrida Montante															
Ano	**Média**					**Máximo**					**Mínimo**				
	Obs.	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**
2008	9,46	6,33	-33,13%	9,24	-2,35%	96,17	147,10	52,96%	96,78	0,63%	2,82	3,16	12,06%	2,28	-19,00%
2009	17,26	13,26	-23,17%	15,40	-10,74%	177,34	133,00	-25,00%	145,26	-18,09%	5,10	4,72	-7,37%	3,98	-22,03%
2010	10,14	9,21	-9,18%	10,19	0,43%	181,43	96,18	-46,99%	82,17	-54,71%	3,92	3,81	-2,78%	2,70	-31,05%
2011	14,60	14,68	0,53%	14,56	-0,26%	105,36	87,94	-16,53%	102,88	-2,35%	5,31	5,52	3,90%	3,51	-33,85%
2012	10,10	9,53	-5,60%	8,68	-14,03%	91,73	62,71	-31,64%	61,38	-33,09%	4,11	3,86	-6,01%	2,58	-37,21%
2013	11,00	10,17	-7,52%	11,12	1,08%	100,71	80,92	-19,65%	73,93	-26,59%	3,55	3,99	12,51%	3,11	-12,34%
Erro médio	**-**	**-**	**13,19%**	**-**	**4,81%**	**-**	**-**	**32,1%**	**-**	**22,6%**	**-**	**-**	**7,4%**	**-**	**25,9%**

Figura 23 – Comparação das vazões médias, máximas e mínimas observadas e simuladas pelos modelos- Estação fluviométrica 57370000 - Período de validação

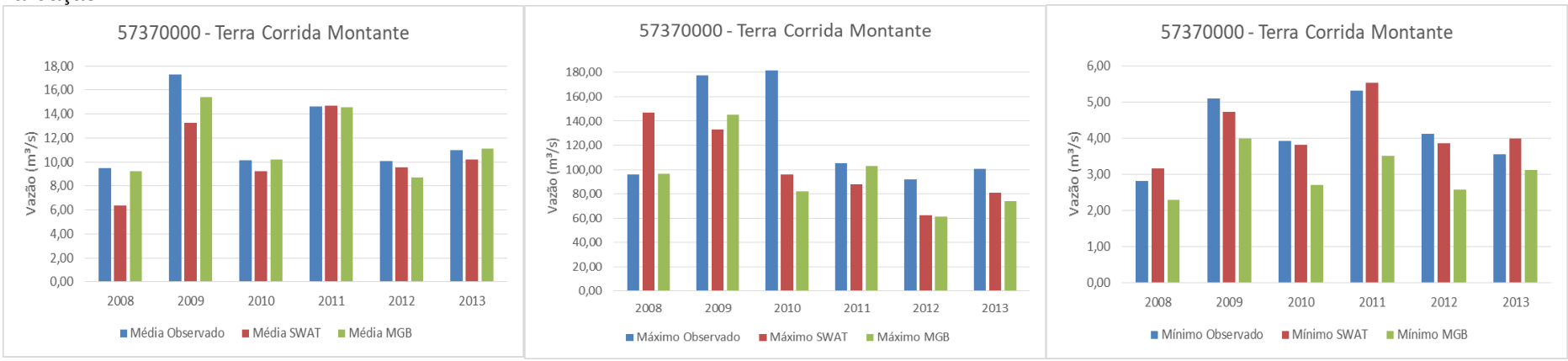
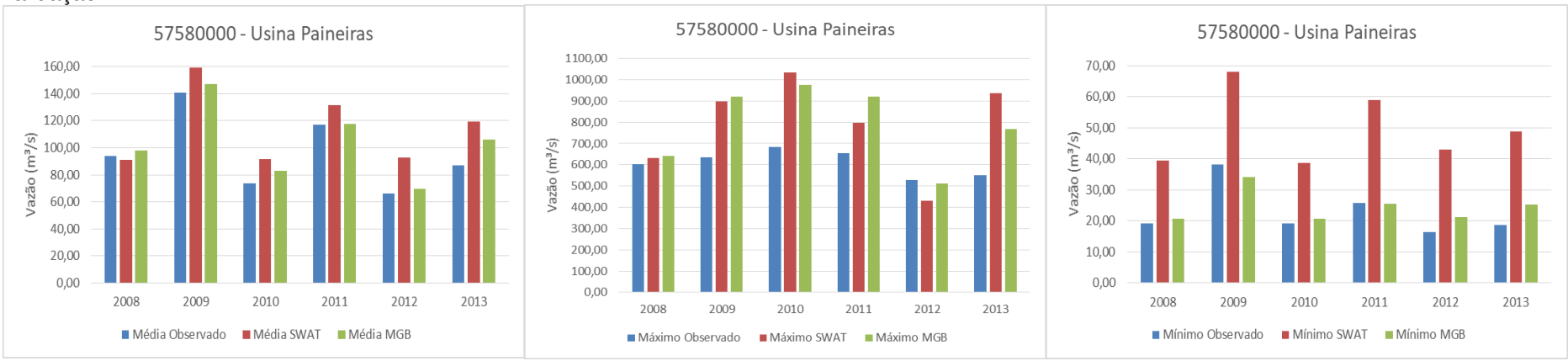


Tabela 23 – Média, máximo e mínimo das vazões diárias (m³/s) e erro médio para cada ano do período de validação na sub-bacia relativa ao posto 57580000.

57580000 - Usina Paineiras															
Ano	**Média**					**Máximo**					**Mínimo**				
	Obs.	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**
2008	94,00	90,87	-3,32%	98,16	4,43%	603,96	630,60	4,41%	640,03	5,97%	19,20	39,47	105,57%	20,69	7,78%
2009	140,68	159,34	13,26%	147,40	4,77%	635,92	898,70	41,32%	921,50	44,91%	38,18	68,05	78,23%	34,10	-10,69%
2010	73,61	91,89	24,83%	82,98	12,73%	682,64	1035,00	51,62%	974,42	42,74%	19,26	38,53	100,05%	20,69	7,44%
2011	117,33	131,58	12,15%	117,87	0,46%	655,02	798,40	21,89%	921,92	40,75%	25,85	58,99	128,20%	25,42	-1,66%
2012	66,41	92,86	39,82%	69,74	5,01%	528,84	431,00	-18,50%	511,78	-3,23%	16,47	43,04	161,32%	21,26	29,06%
2013	86,96	119,13	37,00%	106,34	22,28%	549,62	938,20	70,70%	767,65	39,67%	18,69	48,73	160,73%	25,33	35,50%
Erro médio	**-**	**-**	**21,73%**	**-**	**8,28%**	**-**	**-**	**34,7%**	**-**	**29,5%**	**-**	**-**	**122,4%**	**-**	**15,4%**

Figura 24 – Comparação das vazões médias, máximas e mínimas observadas e simuladas pelos modelos- Estação fluviométrica 57580000 - Período de validação



Para o posto 57370000, quanto às vazões médias anuais, as médias dos módulos dos erros percentuais corresponderam a 13,2% para o SWAT e 4,8% para o MGB. Os maiores erros, para os modelos SWAT e MGB foram 33,1% (2008) e 14,0% (2012), respectivamente.

Na comparação entre as vazões médias diárias simuladas pelos modelos SWAT e MGB, para os anos 2008 a 20013, período de validação, pode ser observado que para 5 (cinco) dos 6 (seis) anos, 2008, 2009, 2010, 2011 e 2013 os erros percentuais correspondentes ao SWAT foram superiores.

Quanto às vazões diárias máximas anuais, as médias dos módulos dos erros percentuais corresponderam a 32,1% para o SWAT e 22,6% para o MGB. Os maiores erros, para os modelos SWAT e MGB foram 53,0% (2008) e 54,7% (2010), respectivamente.

Quanto às vazões diárias mínimas anuais, as médias dos módulos dos erros percentuais corresponderam a 7,4% para o SWAT e 25,9% para o MGB. Os maiores erros, para os modelos SWAT e MGB foram 12,5% (2013) e 37,2% (2012), respectivamente.

Em síntese, relativamente ao posto 57370000, considerando os resultados relativos aos erros percentuais, pode ser observado que os relativos às estimativas das vazões médias anuais obtidas por meio de simulações com os modelos, para o período de validação, o SWAT apresentou valores superiores aos correspondentes ao SWAT. Quanto aos erros percentuais relativos às estimativas de vazões máximas anuais, os correspondentes ao MGB se apresentaram muito superiores aos relativos ao SWAT. Quanto aos erros percentuais relativos às estimativas de vazões mínimas anuais, os correspondentes ao MGB se apresentaram muito superiores aos relativos ao SWAT.

Para o posto 57580000, quanto às vazões médias anuais, as médias dos módulos dos erros percentuais corresponderam a 21,7% para o SWAT e 8,3% para o MGB. Os maiores erros, para os modelos SWAT e MGB foram 39,8% (2012) e 22,3% (2013), respectivamente.

Na comparação entre as vazões médias diárias simuladas pelos modelos SWAT e MGB, para os anos 2008 a 20013, período de validação, pode ser observado que para 5 (cinco) dos 6 (seis) anos, 2009, 2010, 2011, 2012 e 2013 os erros percentuais correspondentes ao SWAT foram superiores.

Quanto às vazões diárias máximas anuais, as médias dos módulos dos erros percentuais corresponderam a 34,7% para o SWAT e 29,5% para o MGB. Os maiores erros, para os modelos SWAT e MGB foram 70,7% (2013) e 44,9% (2009), respectivamente.

Quanto às vazões diárias mínimas anuais, as médias dos módulos dos erros percentuais corresponderam a 122,4% para o SWAT e 15,4% para o MGB. Os maiores erros, para os modelos SWAT e MGB foram 161,3% (2012) e 35,5% (2013), respectivamente.

Em síntese, relativamente ao posto 57580000, considerando os resultados relativos aos erros percentuais, pode ser observado que os erros relativos às estimativas das vazões médias e mínimas anuais obtidas por meio de simulações com os modelos, para o período de validação, o SWAT apresentou valores muito superiores aos correspondentes ao SWAT. Quanto aos erros percentuais relativos às estimativas de vazões máximas anuais, os correspondentes ao SWAT apresentaram valores superiores aos relativos ao MGB.

No Anexo H são apresentadas as tabelas e os gráficos equivalentes às Tabelas 22 e 23 e Figuras 23 e 24, correspondentes às outras 5(cinco) seções de controle. A Tabela 24 mostra as médias dos erros percentuais anuais, relativas aos modelos SWAT e MGB, correspondentes às vazões médias, máximas e mínimas anuais, para o período de validação.

Tabela 24 - Erros médios percentuais, relativos às vazões médias, máximas e mínimas anuais, para o período de validação

Posto	Vazões médias (SWAT)	Vazões Médias (MGB)	Vazões Máximas (SWAT)	Vazões Máximas (MGB)	Vazões Mínimas (SWAT)	Vazões Mínimas (MGB)
57370000	13,2	4,8	32,1	22,6	7,4	25,9*
57580000	21,7	8,3	34,7	29,5	122,4	15,4
57400000	6,9	5,7	19,7	11,5	45,7	14,7
57420000	28,8	3,2	45,5	21,7	48,3	29,9
57450000	8,3	7,3	39,4	20,6	76,6	11,9
57490000	17,2	16,7	22,2	15,0	176,0	82,3
57550000	27,8	17,8	27,5	8,2	190,2	49,6
Média	17,7	9,1	31,6	18,4	95,2	32,8
Máxima	28,8	17,8	45,5	29,5	190,2	82,3

*Erros percentuais maiores para o MGB, em comparação com os correspondentes para o SWAT.

Quanto aos períodos de validação, o erro percentual relativo às vazões médias, máximas e mínimas, para o MGB foi superior ao correspondente para o SWAT para 1(um) dos 7(sete) postos, para vazões mínimas. Desta forma, quase todos os erros

percentuais relativos ao SWAT foram superiores aos correspondentes ao MGB. Cabe observar que as médias dos erros percentuais calculados para os 7(sete) postos relativos ao MGB foram inferiores aos do SWAT para todas as variáveis (vazões médias, máximas e mínimas).

A Tabela 25 apresenta as estatísticas de precisão calculadas para cada um dos pontos de controle localizados dentro da bacia do rio Itapemirim no período de validação.

Tabela 25 – Valores das estatísticas de precisão para cada um dos pontos de controle resultantes da aplicação dos modelos na simulação hidrológica da bacia do rio Itapemirim, no período de validação.

	R2		NSE		NSElog		Pbias		RMSE		$(\sigma_{Obs})/2$
	SWAT	**MGB**	**SWAT**	**MGB**	**SWAT**	**MGB**	**SWAT**	**MGB**	**SWAT**	**MGB**	
57370000	0,69	0,82	0,67	0,82	0,68	0,86	-13	-5	7,50*	5,54	6,50
57400000	0,79	0,86	0,78	0,84	0,81	0,87	-6	2	8,97	7,56	9,59
57420000	0,45	0,72	0,34*	0,72	0,45*	0,79	-29*	-7	16,44*	10,80*	10,14
57450000	0,71	0,82	0,65	0,82	0,73	0,81	-5	-2	37,29*	26,84	31,65
57490000	0,61	0,78	0,59	0,72	0,63	0,70	-9	13	13,69*	11,19*	10,66
57550000	0,62	0,83	0,57	0,78	0,38*	0,76	22*	17*	18,47*	13,31	14,15
57580000	0,54	0,77	0,49	0,70	0,51	0,82	18*	7	69,51*	53,37*	48,77

Pbias: percentagem bias; NSE: coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; NSElog; logaritmo do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; RMSE: erro médio quadrático; σ_{Obs}: desvio padrão observado.

* Valores fora dos limites proposto por Moriasi et al. (2012).

Segundo os critérios de Moriasi et al. (2012), o posto 57400000, quanto à validação, foi o único apresentando todas as estatísticas conformes. Excetuando-se estação, todas apresentaram valores de RMSE fora dos limites estabelecidos. A modelagem com o modelo SWAT para a estação 57420000 foi a que apresentou mais estatísticas não conformes (NSE, NSElog,Pbias e RMSE). Para esta mesma estação a modelagem com o MGB apresentou as estatísticas Pbias e RMSE não conformes.

Considerando-se os valores da estatística R2, todos os valores para todas as estações se apresentaram conformes. Para NSE, a exceção, quanto à conformidade, foi a modelagem com o SWAT para a estação 57420000. Para NSElog, as exceções foram as modelagens com o SWAT para as estações 57420000 e 57550000. Quanto ao Pbias, os valores conformes corresponderam, apenas, as correspondentes às modelagens com o MGB para as estações 57400000 e 57580000. Quanto ao RMSE, os valores conformes corresponderam, apenas, as correspondentes às modelagens

com os dois modelos para a estação 57400000 e com o MGB para a estação 57550000.

Na Tabela 26 são apresentadas as estatísticas de precisão calculadas seguindo recomendação de Monteiro (2016) e as médias simples dos parâmetros estatísticos.

Tabela 26 – Estatísticas de precisão resultantes da aplicação dos modelos na simulação hidrológica na bacia do rio Itapemirim, para período de validação.

	R2		NSE		NSElog	
	SWAT	**MGB**	**SWAT**	**MGB**	**SWAT**	**MGB**
Médias ponderadas considerando áreas de drenagem para cada ponto.	0,61	0,80	0,57	0,76	0,60	0,80
Médias simples.	0,63	0,80	0,59	0,77	0,60	0,80

Assim como para o período de calibração, considerando o critério sugerido por Moriasi et al. (2015) e os resultados relativos aos parâmetros estatísticos NSE, R2 e NSElog, os modelos simularam de forma satisfatória as vazões das sub-bacias para o período de validação, sendo que o MGB apresentou melhores resultados relativos aos parâmetros estatísticos.

Os valores de R2, para o período de validação do SWAT se situaram entre 0,54, para a estação 57580000 e 0,79, para a estação 57400000. Para o mesmo período o MGB, apresentou valores de R2 variando entre 0,72, para a estação 57420000 e 0,86, para a estação 57400000.

Quanto aos valores de NSE do SWAT, os valores se situaram entre 0,34, para a estação 57420000 e 0,78, para a estação 57400000. Enquanto para o MGB, os valores de NSE variaram entre 0,72, para as estações 57420000 e 57490000 e 0,84, para a estação 57400000.

Os valores de NSElog se situaram entre 0,38 para a estação 57550000 e 0,81, para a estação 57400000. Enquanto para o mesmo período no MGB, os valores de NSElog variaram entre 0,70, para a estação 57490000 e 0,87, para a estação 57400000.

Quanto aos valores de Pbias, para o período de validação do SWAT, os valores se situaram entre -29, para a estação 57420000 e -5, para a estação 57450000. Para o período de validação do MGB, os valores de Pbias variaram entre 17, para a estação 57550000 e 2 e -2, para as estações 57400000 e 57450000.

Os valores de RMSE devem ser analisados juntamente com os desvios padrão dos dados observados. Para o período de validação do SWAT, o erro médio foi até 43% maior que a metade do desvio padrão observados (estação 57580000), enquanto para o MGB foi até 21% menor (57400000). As estações 57420000, 57490000 e 575880000 apresentaram erros maiores que o recomendado para ambos modelos.

As Figuras 25, 26 e 27 apresentam a distribuição espacial das estatísticas de precisão NSE, R2 e logNSE para o período de validação (2008-2013). Nas Figuras 28 a 31, é possível comparar graficamente o comportamento das vazões simuladas pelos modelos SWAT e MGB em relação às vazões observadas em monitoramento. Os gráficos das demais estações são apresentadas no Anexo I.

As correlações entre vazões observadas e simuladas pelo SWAT e MGB no período de validação são mostradas no Anexo G. Assim como para o período de calibração, o MGB apresentou melhores valores de coeficientes angulares, lineares e de determinação no período de validação.

Figura 25 – Desempenho dos modelos SWAT e MGB em termos de NSE durante o período de validação

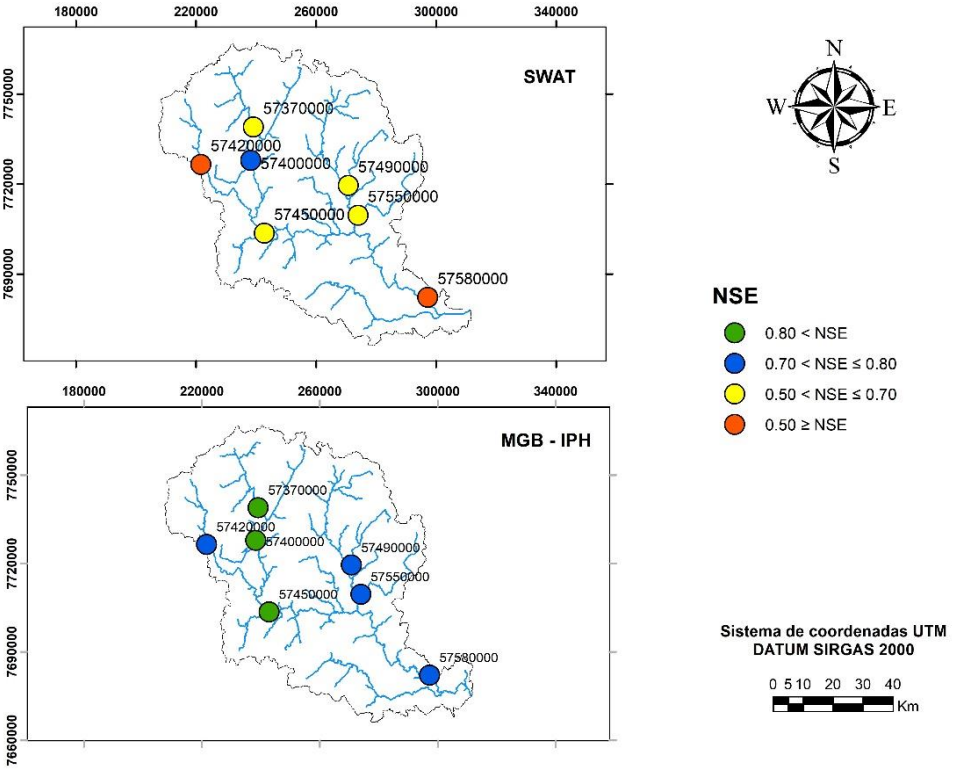


Figura 26 – Desempenho dos modelos SWAT e MGB em termos de R2 durante o período de validação

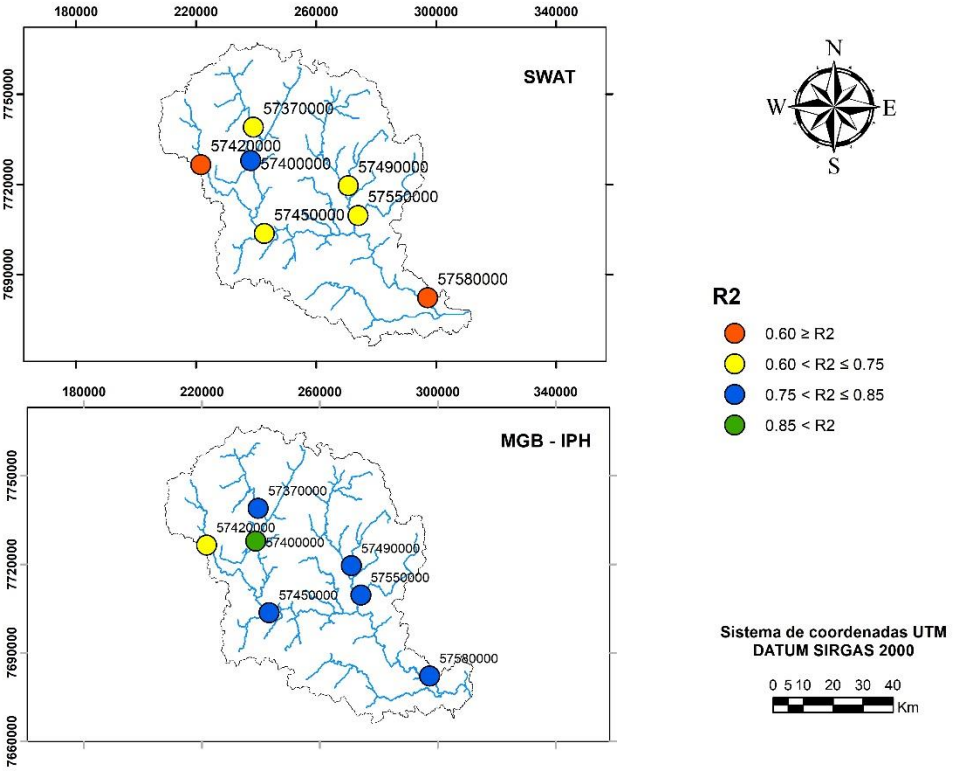


Figura 27 – Desempenho dos modelos SWAT e MGB em termos de logNSE durante o período de validação

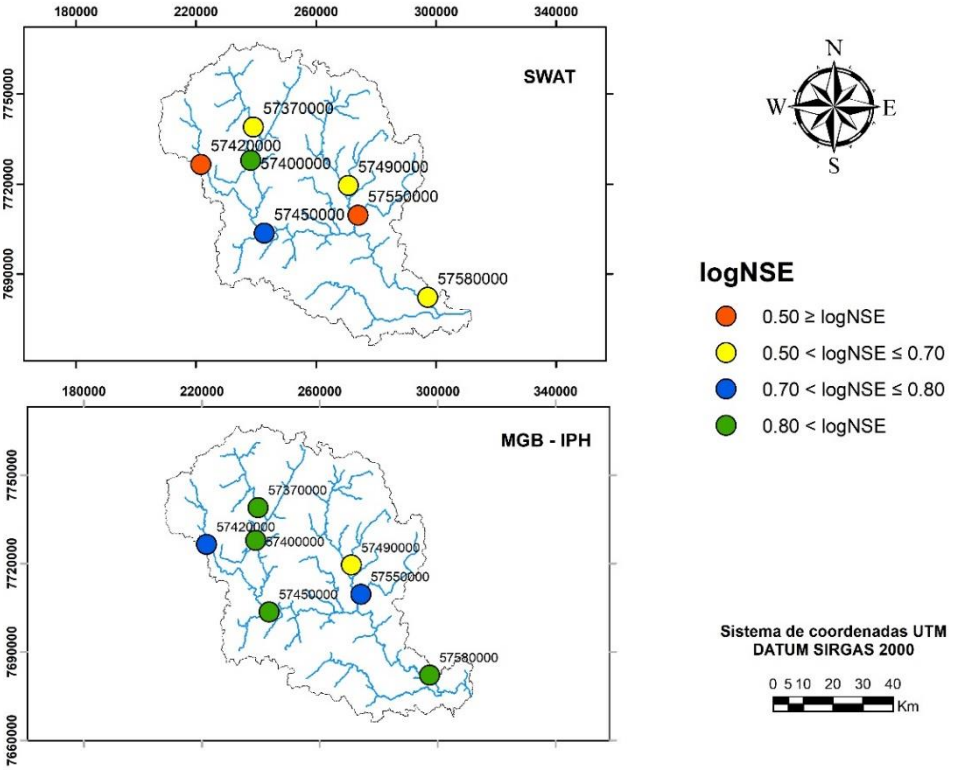
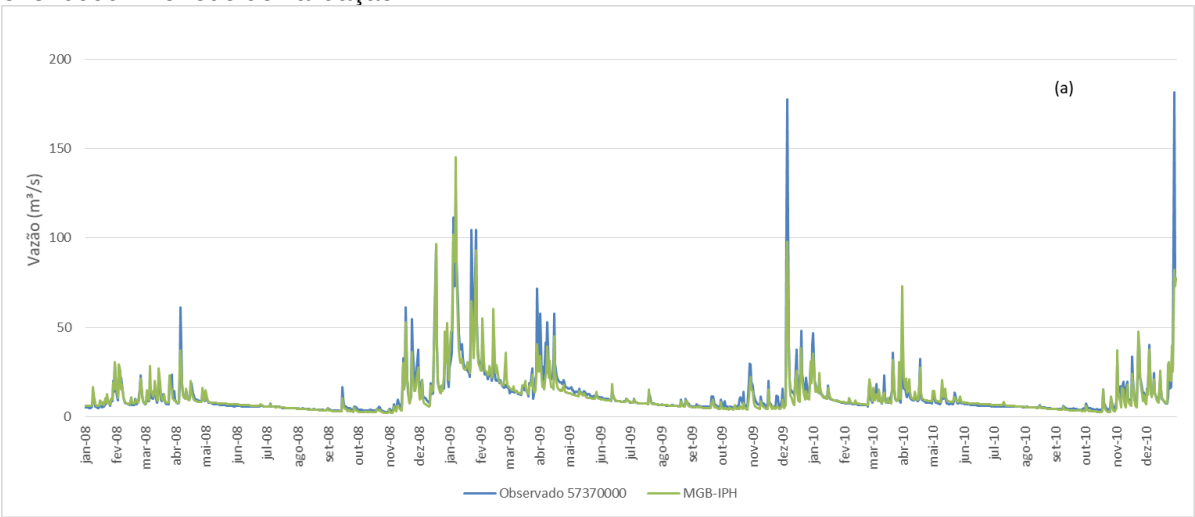
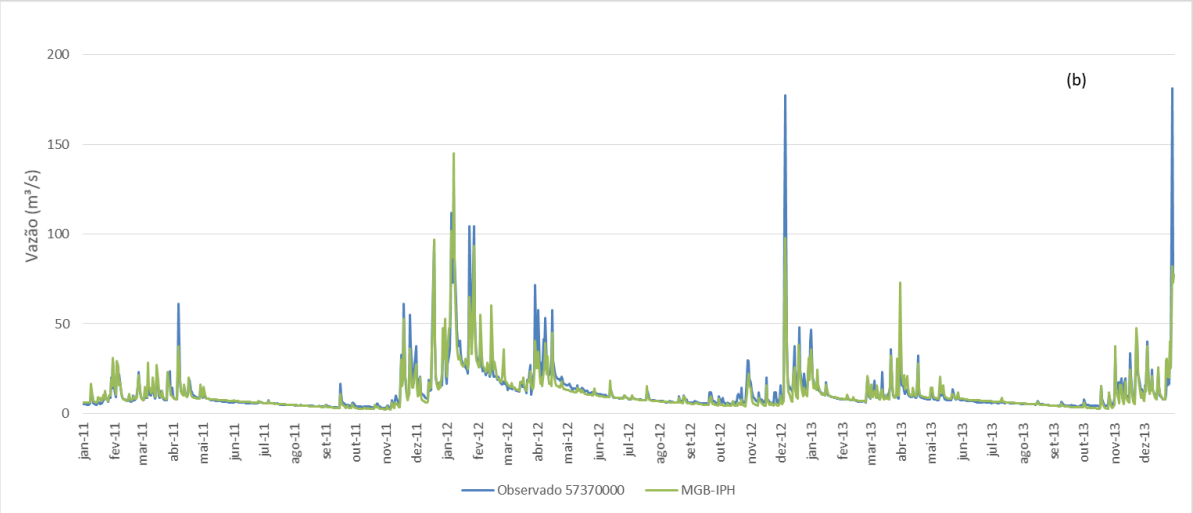


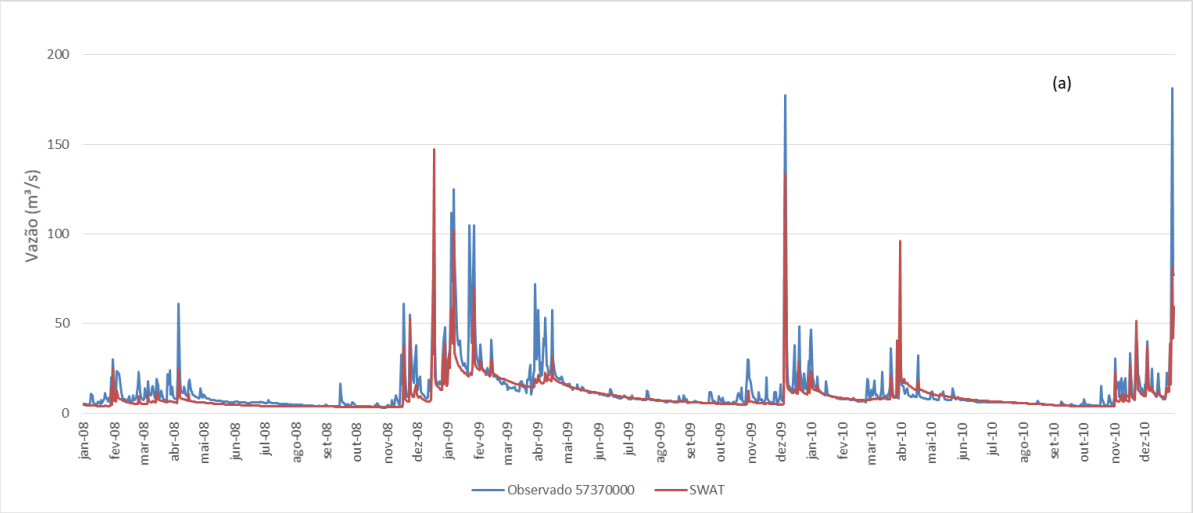
Figura 28 – Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo MGB - Estação fluviométrica 57370000 - Período de validação

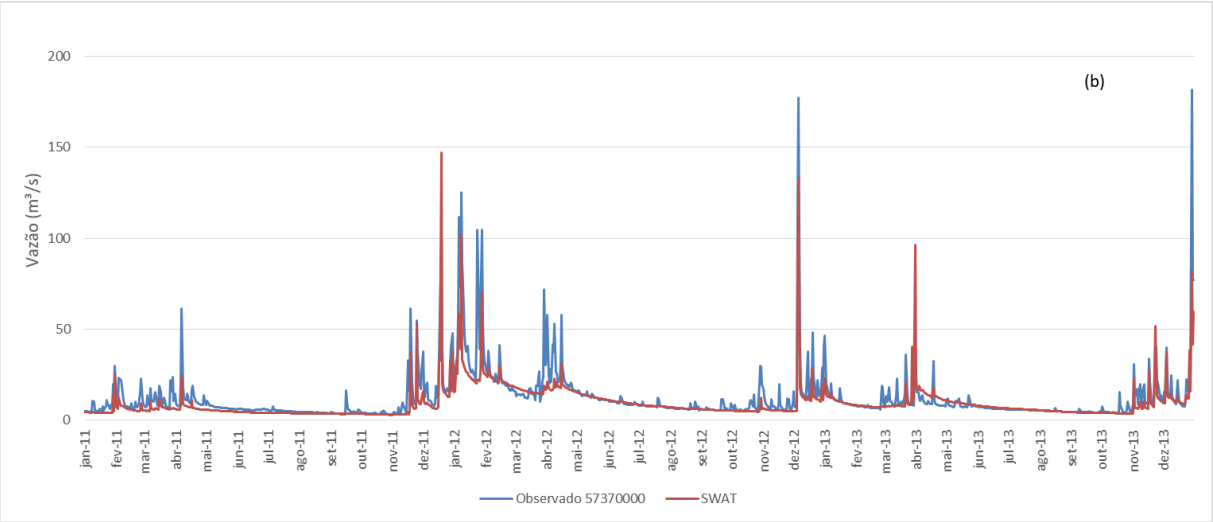




Fonte: o autor.

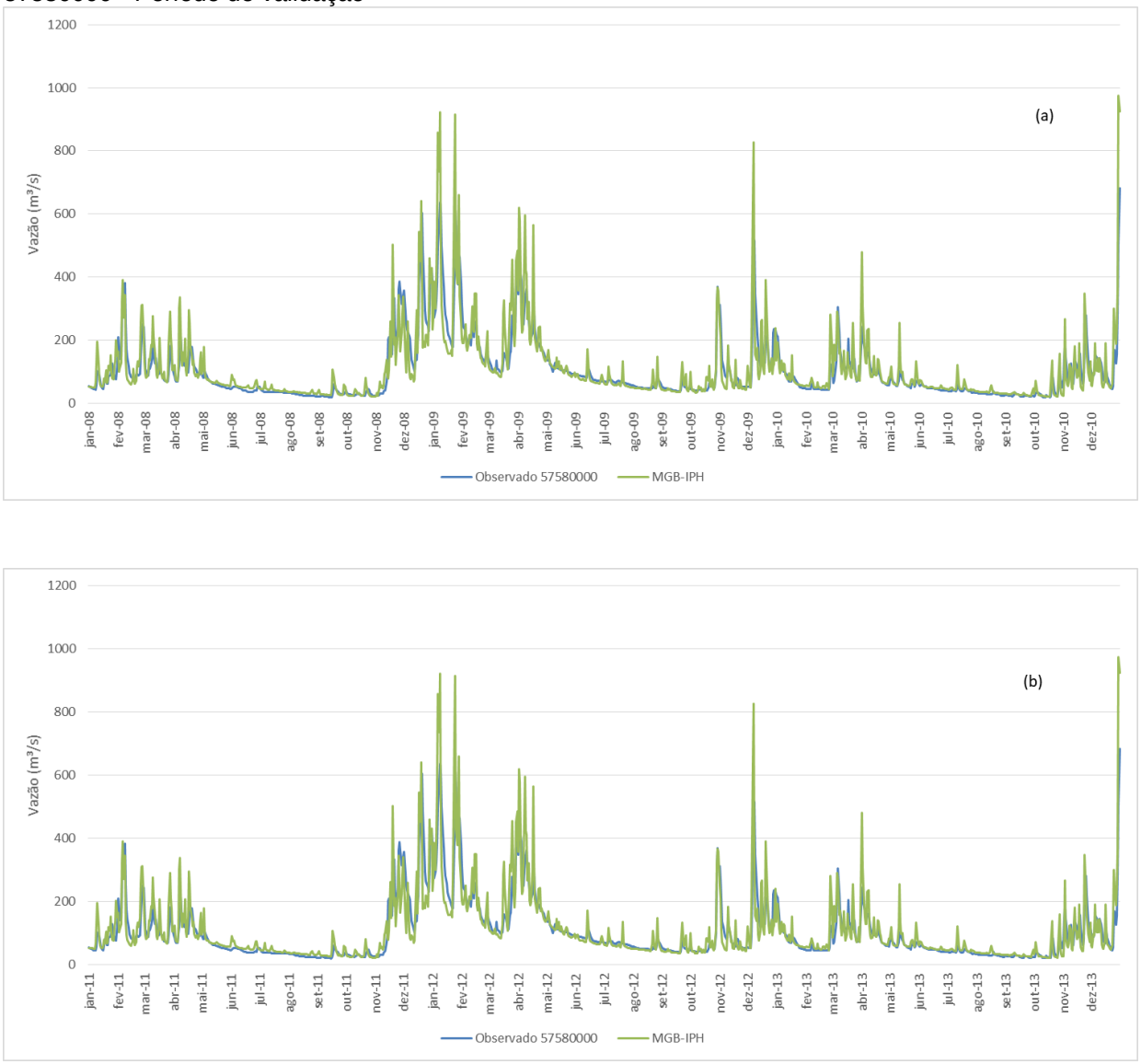
Figura 29 – Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo SWAT - Estação fluviométrica 57370000 - Período de validação





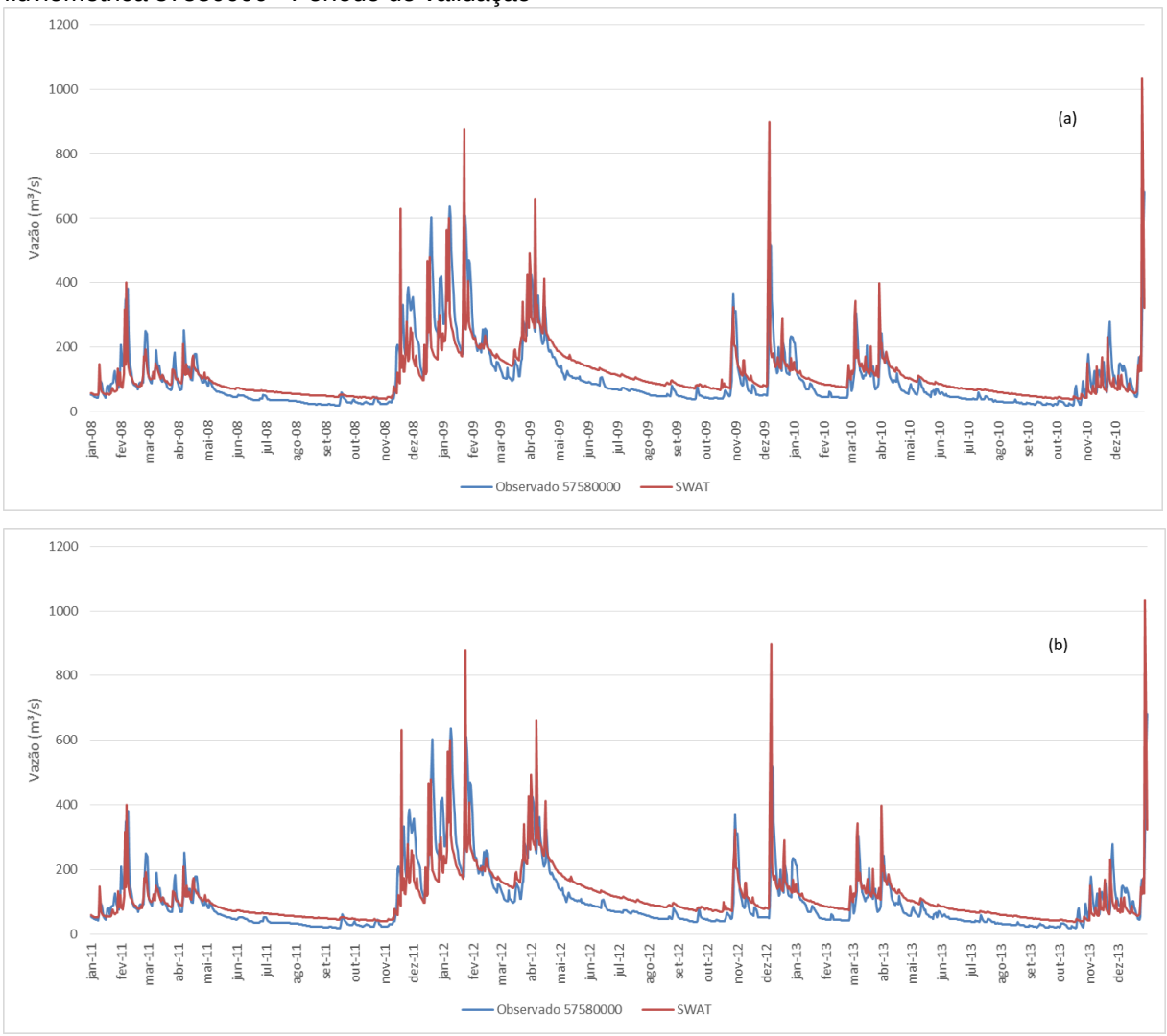
Fonte: o autor.

Figura 30 – Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo MGB - Estação fluviométrica 57580000 - Período de validação



Fonte: o autor.

Figura 31 – Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo SWAT - Estação fluviométrica 57580000 - Período de validação



Fonte: o autor.

Assim como na calibração, os valores simulados se ajustaram melhor aos valores observados de vazões médias e vazões de pico menores. Ambos modeles superestimaram as vazões de pico maiores. As vazões mínimas foram melhor representadas no MGB, sendo que o SWAT tendeu a superestimá-las.

Em geral ambos modelos capturaram as magnitudes e as variabilidades das vazões observadas para as estações de monitoramento analisadas, porém os resultados não indicam que qualquer um desses modelos hidrológicos seja superior ao outro para todos os locais ou para todas as medidas de desempenho de modelo.

Diante dos resultados dos valores das funções objetivo verifica-se a necessidade de escolher mais de uma função para análise dos resultados, bem como a utilização de métodos qualitativos. Desta forma seria possível avaliar melhor o comportamento dos

modelos para períodos de cheia e estiagem, bem como sua variação ao longo dos anos observados.

Harmel et al. (2006) e Harmel et al. (2010) destacaram que a incerteza de medição nos dados de vazão, como a presença de falhas, e os curtos registros de vazão podem resultar em uma fraca previsão hídrica do SWAT. A qualidade da informação meteorológica também pode estar relacionada com a eficiência na resposta do modelo. O estudo realizado por Strauch et al. (2012) mostrou que uma boa distribuição das estações meteorológicas na área em estudo pode ter influência na qualidade do ajuste entre vazões simuladas e observadas, e consequentemente no desempenho do modelo. Porém, apesar de possuir mais estações e uma melhor distribuição, o SWAT não apresentou melhores resultados que o MGB.

O modelo MGB permite menor liberdade ao modelador e necessita menor volume de dados de entrada, facilitando o processo de calibração. Tegegne, Park e Kim (2017) selecionaram três modelos de chuva-vazão estruturalmente diferentes para avaliação dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas selecionadas da bacia do alto rio Nilo Azul. Os modelos conceituais e mais simples, GR4J e IHCRAS, foram facilmente montados e calibrados nas quatro bacias hidrográficas selecionadas, enquanto o tempo de preparação e os esforços necessários para o uso do modelo SWAT foram altos em comparação com os dois modelos conceituais simples. Projeto de intercomparação de modelos distribuídos (REED et al., 2004) sugere que fatores como a formulação do modelo, a parametrização e a habilidade do modelador podem ter um impacto maior na precisão da simulação do que simplesmente se o modelo é concentrado ou distribuído.

Strauch e Volk, (2013) afirmam que simulações boas ou satisfatórias podem ser possíveis mesmo sem qualquer melhoria do módulo de crescimento vegetal no SWAT, já que o modelo pode ser visto como um dos modelos que Kirchner (2006) descreveu como modelos ricos em parâmetros que podem ter sucesso como marionetes matemáticas, dançando de forma a coincidir com os dados de calibração, mesmo que suas premissas subjacentes sejam irreais.

A calibração de modelos e a otimização dos parâmetros é desafiadora para modelos complexos, devido à incerteza na grande quantidade de parâmetros (FIENEN et al., 2009; FOGLIA et al., 2009; KEATING et al., 2010; YE et al., 2014). Além disso existem incertezas na forma de simplificação de processo, processos não contabilizados no

modelo e processos que ocorrem na bacia hidrográfica sem o conhecimento do modelador (BAILEY, 2015).

A calibração no SWAT pode ser realizada de forma manual no próprio programa, ou com o auxílio do SWAT-CUP. Neste o usuário pode escolher entre três métodos de otimização distintos SUFI2, GLUE e ParaSol, cada um deles encontram uma solução diferente (YANG ET AL., 2008). Devido à grande quantidade de parâmetros possíveis de calibração no SWAT, esta é uma tarefa dispendiosa e que demanda muito cuidado do modelador na escolha dos parâmetros e faixa de variação, porém existem muitos trabalhos que auxiliam nesta etapa (BALDISSERA, 2005; DA SILVA, 2011; FUKUNAGA, 2012; MOREIRA, 2017; OLIVEIRA, 2014; PEREIRA, 2013; SARTORI; GENOVEZ; LOMBARDI NETO, 2005) . Neste trabalho a calibração do SWAT foi realizada de forma automática com auxílio do SUFI-2 do SWAT-CUP.

A calibração no MGB não foi uma tarefa tão dispendiosa, uma vez que a quantidade de parâmetros calibráveis era menor, além disso o modelo fornece um manual simples para auxiliar nesta tarefa (JARDIM et al., 2017). A calibração pode ser realizada manualmente e/ou automaticamente com um função multiobjetivo baseada no algoritmo genético MOCOM-UA (YAPO et al., 1998). Desta forma, a calibração do MGB foi realizada manualmente, de montante para a jusante por meio da análise qualitativa dos gráficos, bem como evolução dos parâmetros estatísticos.

De maneira geral, os valores observados e simulados pelos modelos apresentaram comportamentos semelhantes, principalmente para vazões médias e vazões de pico menores. Já para as vazões de pico maiores, os modelos superestimaram as vazões requerendo melhor ajuste para essas situações. Para as vazões mínimas o modelo MGB apresentou uma melhor representação quando comparado com o SWAT, estando de acordo com os parâmetros estatísticos obtidos. O SWAT tende a superestimar as vazões mínimas, o que pode ser melhor observado para os pontos de 57450000, 57550000 e 57580000, em os valores das vazões mínimas são maiores.

5.4.2.3 Vazões mensais e trimestrais

As Figuras 32 a 35 mostram os hidrogramas das vazões médias relativos às simulações correspondentes às estações 57370000 e 57580000. A primeira apresenta, dentro das estudadas, uma das menores bacias, de cabeceira, enquanto

que a segunda apresenta a maior, que abrange a quase totalidade da bacia do rio Itapemirim.

Nas Tabelas 27 a 30 são mostrados os valores dos erros percentuais médios trimestrais para os períodos de calibração e validação.

Tabela 27 – Erro percentual médio trimestral para o período de calibração

	57370000		57580000	
	SWAT	**MGB**	**SWAT**	**MGB**
Jan-Fev-Mar	11,9%	17,3%*	12,0%	12,9%*
Abr-Mai-Jun	-18,7%	12,5%	24,2%	16,7%
Jul-Ago-Set	-25,6%	-12,3%	51,1%	8,3%
Out-Nov-Dez	-18,2%	-22,8%*	13,7%	0,3%

*Valores de erros percentuais maiores para o MGB, em comparação com os relativos ao SWAT

Para o posto 57370000, considerando o período de calibração os erros percentuais médios por trimestre relativos ao MGB foram maiores que os correspondentes ao SWAT para os trimestres Jan-Fev-Mar e Out-Nov-Dez, que formam o semestre chuvoso para a bacia do Rio Itapemirim.

Para o posto 57580000, considerando o período de calibração os erros percentuais médios por trimestre relativos ao SWAT foram maiores que os correspondentes ao MGB para os trimestres Abr-Mai-Jun, Jul-Ago-Set e Out-Nov-Dez.

Tabela 28 – Erro percentual médio trimestral para o período de validação

	57370000		57580000	
	SWAT	**MGB**	**SWAT**	**MGB**
Jan-Fev-Mar	-8,3%	6,1%	21,3%	14,3%
Abr-Mai-Jun	3,8%	4,7%*	48,6%	14,0%
Jul-Ago-Set	-3,6%	-7,5%*	90,9%	21,1%
Out-Nov-Dez	-29,2%	-20,7%	17,1%	6,2%

*Valores de erros percentuais maiores para o MGB, em comparação com os relativos ao SWAT

Para o posto 57370000, considerando o período de validação os erros percentuais médios por trimestre relativos ao SWAT foram maiores que os correspondentes ao MGB para os trimestres Jan-Fev-Mar e Out-Nov-Dez, que formam o semestre chuvoso para a bacia do Rio Itapemirim.

Para o posto 57580000, considerando o período de validação os erros percentuais médios por trimestre relativos ao SWAT foram maiores que os correspondentes ao MGB para todos os trimestres.

Tabela 29 – Média do módulo do erro percentual médio por trimestre no período de calibração

	57370000		57580000	
	SWAT	**MGB**	**SWAT**	**MGB**
Jan-Fev-Mar	17,1%	19,0%*	15,5%	15,9%*
Abr-Mai-Jun	19,8%	15,0%	27,4%	18,7%
Jul-Ago-Set	25,6%	18,1%	51,1%	12,4%
Out-Nov-Dez	19,5%	23,2%*	22,0%	13,0%

*Valores de erros percentuais maiores para o MGB, em comparação com os relativos ao SWAT

Para o posto 57370000, considerando o período de calibração as médias dos módulos dos erros percentuais médios por trimestre relativos ao MGB foram maiores que os correspondentes ao SWAT para os trimestres Jan-Fev-Mar e Out-Nov-Dez, que formam o semestre chuvoso para a bacia do Rio Itapemirim.

Para o posto 57580000, considerando o período de calibração as médias dos módulos dos erros percentuais médios por trimestre relativos ao SWAT foram maiores que os correspondentes ao MGB para os trimestres Abr-Mai-Jun, Jul-Ago-Set e Out-Nov-Dez.

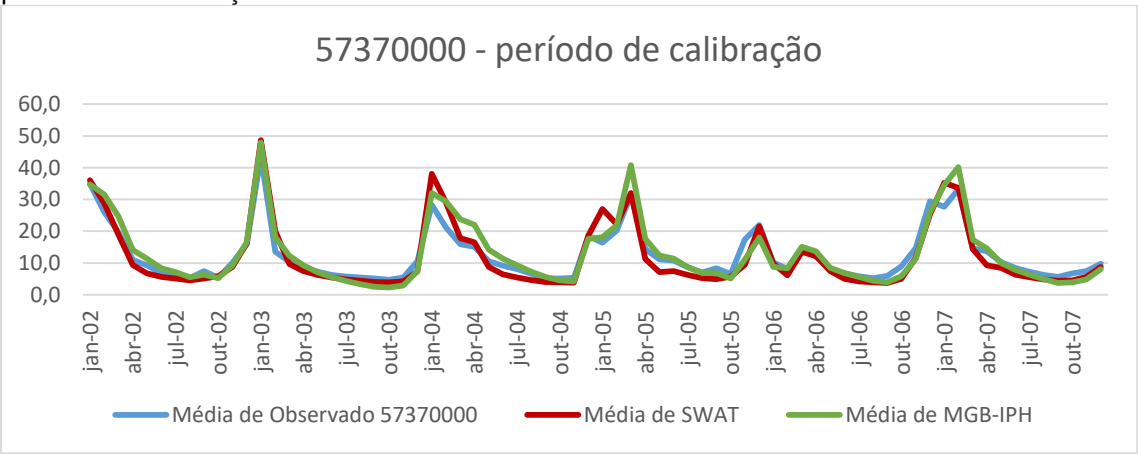
Tabela 30 – Média do módulo do erro percentual médio por trimestre no período de validação

	5737		5758	
	SWAT	**MGB**	**SWAT**	**MGB**
Jan-Fev-Mar	18,8%	10,8%	31,0%	18,8%
Abr-Mai-Jun	18,7%	12,9%	48,6%	15,0%
Jul-Ago-Set	11,1%	13,2%*	90,9%	21,6%
Out-Nov-Dez	29,2%	20,7%	32,1%	16,8%

Para o posto 57370000, considerando o período de validação as médias dos módulos dos erros percentuais médios por trimestre relativos ao SWAT foram maiores que os correspondentes ao MGB para os trimestres Jan-Fev-Mar, Abr-Mai-Jun e Out-Nov-Dez.

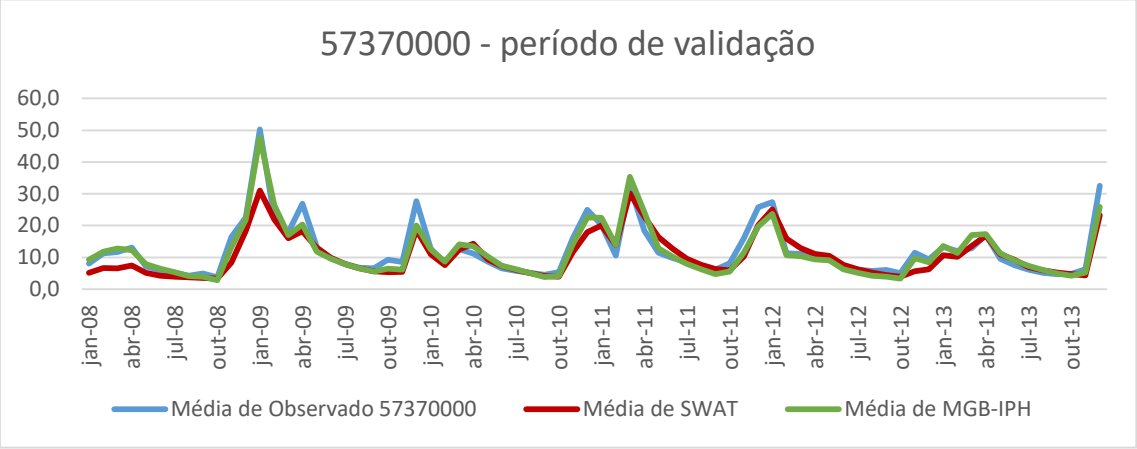
Para o posto 57580000, considerando o período de validação as médias dos módulos dos erros percentuais médios por trimestre relativos ao SWAT foram maiores que os correspondentes ao MGB para todos os trimestres.

Figura 32 – Comparação entre vazões mensais estimadas pelos modelos SWAT e MGB para os períodos de calibração - Ponto de monitoramento 57370000



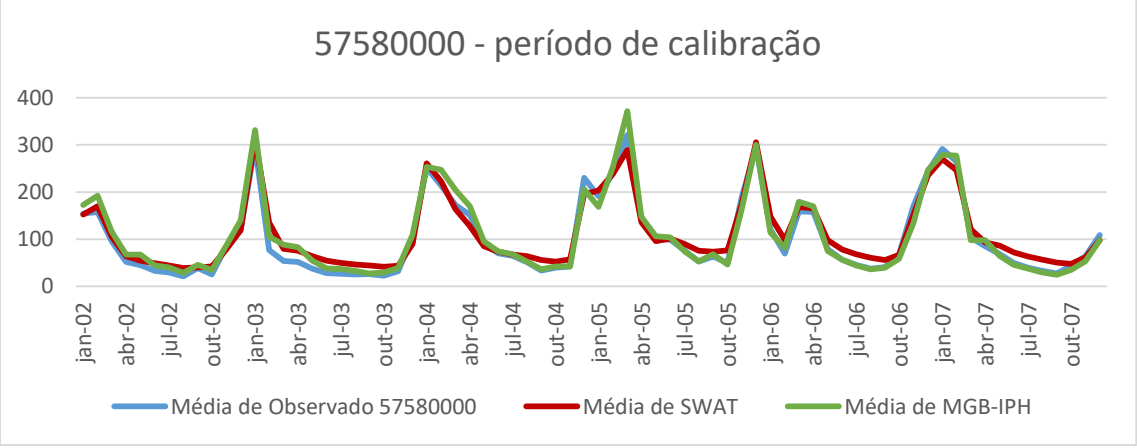
Fonte: o autor.

Figura 33 – Comparação entre vazões mensais estimadas pelos modelos SWAT e MGB para os períodos de validação - Ponto de monitoramento 57370000



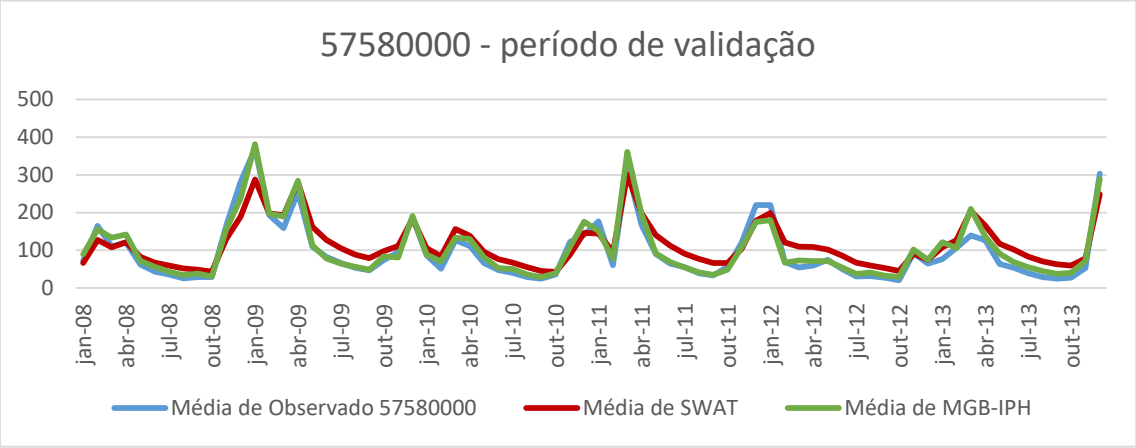
Fonte: o autor.

Figura 34 – Comparação entre vazões mensais estimadas pelos modelos SWAT e MGB para os períodos de calibração - Ponto de monitoramento 57580000



Fonte: o autor.

Figura 35 – Comparação entre vazões mensais estimadas pelos modelos SWAT e MGB para os períodos de validação - Ponto de monitoramento 57580000



Fonte: o autor.

As Figuras 32 a 35 mostram que geralmente as variações nos valores simulados pelos modelos SWAT e MGB acompanharam as variações das vazões históricas registradas nas estações 57370000 e 57580000, nos períodos de calibração e validação.

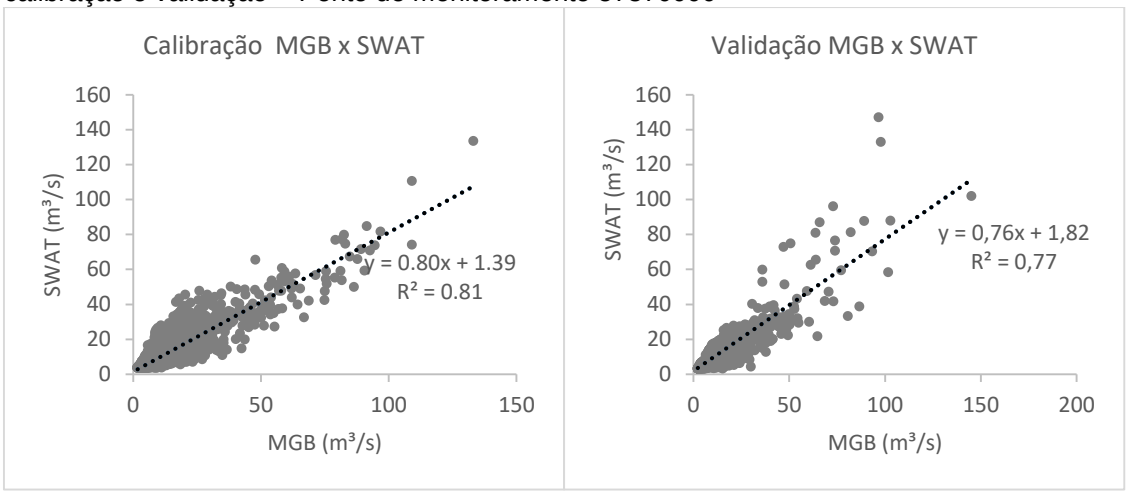
5.4.2.4 Correlação entre os modelos

A Tabela 31 sumariza os valores dos coeficientes de determinação (R2) entre as vazões calculadas pelo MGB e as calculadas pelo SWAT. Nas Figuras 36 e 37 são apresentados os gráficos de correlação para as estações fluviométrica 57370000 e 57580000, com as respectivas linhas de tendência linear. Os gráficos relativos às demais estações são apresentados no Anexo J.

Tabela 31 – Coeficiente de determinação (R2) entre os modelos SWAT e MGB

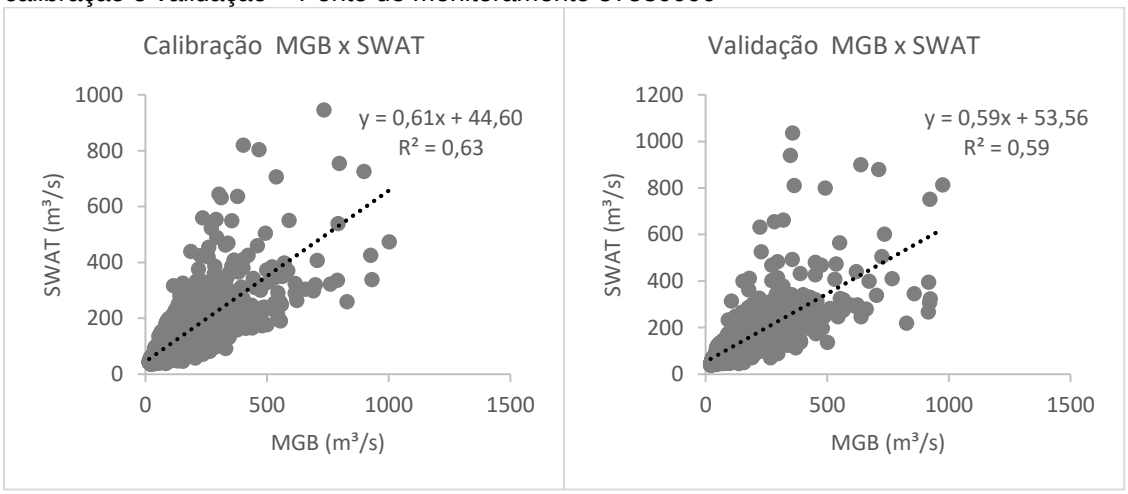
	Calibração (2002-2007)	**Validação (2008-2013)**
57370000	0,82	0,77
57400000	0,80	0,80
57420000	0,82	0,65
57450000	0,84	0,81
57490000	0,70	0,75
57550000	0,74	0,74
57580000	0,63	0,59

Figura 36 – Correlação entre vazões estimadas pelos modelos SWAT e MGB para os períodos de calibração e validação - Ponto de monitoramento 57370000



Fonte: o autor.

Figura 37 – Correlação entre vazões estimadas pelos modelos SWAT e MGB para os períodos de calibração e validação - Ponto de monitoramento 57580000



Fonte: o autor.

Pode ser observado na Tabela 31 que para o período de calibração os valores dos coeficientes de determinação variaram entre 0,63 e 0,84, com média 0,76. Para o período de validação a variação foi entre 0,59 a 0,81, com média 0,73.

Nos gráficos apresentados nas Figuras 36 e 37 pode ser observado que ocorreram diferenças significativas entre os valores simulados pelos modelos SWAT e MGB para algumas datas, principalmente para o posto 57580000. Estas diferenças foram observadas em várias datas para as quais pelo menos um dos modelos simulou valores de vazões maiores.

5.4.3 Análise comparativa dos resultados

Semelhanças e diferenças entre valores simulados pelos modelos SWAT e MGB para as mesmas bacias estudadas são influenciadas por diversos fatores, descritos a seguir.

Apesar de suas características particulares, os modelos utilizaram a mesma base de dados de entrada de MDE, tipo e uso do solo e precipitação, sendo que estes foram simplificados e distribuídos de forma diferente dentro de cada um dos modelos, seguindo recomendações específicas. Além disso, ambos utilizam a equação de Pennan-Monteith para cálculo da evapotranspiração.

As equações de geração de escoamento superficial e propagação de escoamento utilizadas para o SWAT e o MGB foram distintas e provavelmente tiveram fortes influências nos resultados relativos a vazões. A equação de geração de escoamento utilizada no SWAT, SCS-CN, é empírica, considerada por alguns autores como imprópria na simulação contínua, enquanto no MGB foram utilizadas variáveis em função do nível de saturação da bacia, seguindo um processo Dunniano. Para a representação da propagação do escoamento foram utilizados os métodos do coeficiente de acúmulo variável proposto por Williams (1969) e de Muskingum-Cunge no SWAT e no MGB, respectivamente. A utilização de outras equações disponíveis para os modelos, a exemplo de Muskingum no SWAT ou Inercial no MGB, poderiam gerar diferentes resultados nas simulações da vazões.

Outro fator que pode ter influenciado nos resultados simulados pelos modelos e em suas diferenças, está relacionado com os algoritmos utilizados utilizados nas delimitações de bacias hidrográficas, geração das redes de drenagem e determinação de características hidráulicas. No SWAT foi utilizado o ‘Watershed Delineation Tool’, disponível dentro do menu do programa. Esta ferramenta utiliza e expande as funções de extensão do ArcGIS e do Spatial Analyst para realizar delineamentos de bacias hidrográficas. O processo de delineamento requer um modelo digital de elevação (DEM) no formato de grade ESRI. O MGB utiliza o pacote IPH-Hydro Tools, um conjunto de ferramentas acoplado ao software livre MapWindow GIS.

Siqueira, et al. (2016) avaliou a aplicabilidade e o desempenho do IPH-Hydro Tools por meio da comparação de seus resultados em relação a outros softwares de SIG (ArcGIS, IDRISI, WhiteBox) disponíveis para esta finalidade. Segundo os autores, o

IPH-Hydro Tools apresentou qualidade de rede de drenagem superior aos relativos aos demais pacotes e menor tempo de processamento necessário para delimitação de bacias, porém foram encontradas algumas limitações como incompatibilidade em relação a matrizes muito grandes e dificuldade na representação de redes de drenagem em áreas extensas com mesma cota, a exemplo de reservatórios e rios muito largos.

Incertezas dos modelos podem ser atribuídas às deficiências na representação do processo e simplificações na parametrização bem como às limitações dos conjuntos de dados utilizados como entrada e validação do modelo.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Os parâmetros dos modelos SWAT e MGB considerados sensíveis no cálculo das vazões do rio Itapemirim estão relacionados com diferentes processos. Quanto ao SWAT, a análise de sensibilidade identificou como importantes os parâmetros ALPHA_BF, GW_REVAP e EPCO, relacionados com o escoamento subterrâneo e os parâmetros CH_N2 e CH_K2, relacionados com os fluxos nos canais. Os parâmetros do MGB considerados sensíveis foram Wm e b, relacionados com o armazenamento de água no solo, Kbas, relacionado com o escoamento subterrâneo e CS, relacionado com a correção do tempo de concentração para drenagem superficial.

O SWAT e o MGB simularam vazões relativamente convergentes entre si no cálculo das vazões para os pontos e períodos analisados, com coeficientes de determinação superiores a 0,7 tanto para o período de calibração como para o período de validação. Considerando os desempenhos dos modelos pelas funções objetivo NSE, R2 e Pbias analisadas, ambos apresentaram resultados satisfatórios, segundo os critérios de Moriasi (2015), para os períodos de calibração e validação, sendo que o MGB apresentou 86% dos resultados classificados como bons ou muito bons, enquanto que o SWAT apresentou 36%.

Ainda que os índices estatísticos para os modelos tenham sido considerados, em geral, satisfatórios, quando analisados os erros percentuais relativos às reproduções de vazões médias, máximas e mínimas estes se apresentaram altos em alguns casos. De forma geral, critérios de classificação de desempenho de modelos, como os de Moriasi (2015), devem ser utilizados com cautela pois são empíricos e podem conduzir a aceitação de modelos que podem apresentar baixa precisão na simulação de vazões de interesse como médias e, principalmente, extremas, máximas e mínimas.

Apesar das diferentes abordagens utilizadas pelos modelos, eles apresentam algumas semelhanças, a exemplo da utilização da equação de Penman-Monteith para o cálculo da evapotranspiração e dos tipos de dados de entrada necessários.

Na aplicação à bacia do rio Itapemirim o MGB apresentou tempos de processamento muito inferiores aos correspondentes aos observados para o SWAT. Quanto à disponibilidade de informações para facilitar a utilização dos modelos, o SWAT dispõe de documentação completa e atualizada, com vários manuais e programas de auxílio. Além disto são disponíveis grandes quantidades de cursos, fóruns e materiais

didáticos. Neste aspecto, o MGB, por ser um modelo relativamente mais novo e de menor alcance geográfico dispõe de uma menor quantidade de informações para auxílio a usuários. Apesar disso, o SWAT foi de mais difícil compreensão devido à quantidade de processos e parâmetros envolvidos e demandou mais tempo para preparo de dados, análise de sensibilidade, calibração e validação.

Devido a fatores como a facilidade de obtenção dos dados dentro do próprio modelo para a bacia analisada, a menor quantidade de parâmetros a ser manipulada e a base de dados mais simples, o modelo MGB foi considerado de mais fácil aplicação. Cabe observar, quanto ao SWAT, que a dificuldade encontrada no estudo poderia ser muito menor no caso de aplicação a bacias localizadas nos Estados Unidos da América, pois o modelo apresentaria internamente dados de entrada e parâmetros.

São recomendados estudos para avaliação de modelos considerando não apenas vazões, mas também processos intermediários; avaliação de estimativas de vazões utilizando outras equações de geração e propagação do escoamento disponíveis nos modelos além de comparações de desempenho dos modelos na aplicação em outras bacias.

Para melhoria do desempenho de modelos na bacia do rio Itapemirim, recomenda-se a continuidade e a expansão da rede de monitoramento para formação de séries de variáveis de entrada mais longas, permitindo aperfeiçoamento na calibração e validação. São sugeridos ainda monitoramentos de outros processos do ciclo hidrológico, como a evapotranspiração, escoamentos superficiais e subterrâneos e a formação de bancos de dados com as características e propriedades dos tipos e usos do solo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, K.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R. A Guideline for Successful Calibration and Uncertainty Analysis for Soil and Water Assessment: A Review of Papers from the 2016 International SWAT Conference. **Water**, v. 10, n. 1, p. 6, 2017.

ABBASPOUR, K. C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLØVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal Hydrology.** v. 524, p. 733–752, 2015.

Agência Estadual de Recursos Hídricos (AGERH). CBH Itapemirim. Disponível em https://agerh.es.gov.br/cbh-itapemirim. Acessado em 20 de outubro de 2018.

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration — guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO. 1998.

AMATYA, D.M., R.W. SKAGGS e J.D. GREGORY. Comparison of Methods for Estimating REF-ET. **ASCE J. of Irrig. & Drain. Engrg.** pp:427-435. 1995.

ANDREASSIAN, V., PERRIN, C., BERTHET, L., MOINE, N LE, LERAT, J., LOUMAGNE, C., OUDIN, L., MATHEVET, T., RAMOS, M.-H., VALERY, A. HESS Opinions “Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models”. **Earth** 1757–1764. 2009.

ARABI, M., GOVINDARAJU, R.S., HANTUSH, M.M. A probabilistic approach for analysis of uncertainty in the evaluation of watershed management practices. J. Hydrol. 333 (2–4), 459–471. 2007

ARNOLD, J. G., MORIASI, D. N., GASSMAN, P. W., ABBASPOUR, K. C., WHITE, J. M., SRINIVASAN, R., SANTHI, C., HARMEL, R. D., VAN GRIESVEN, A., VAN LIEW, M. W., KANNAN, N., KA, M., K. SWAT: Model Use, Calibration and Validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55 n. 4, p. 1491-1508, 2012.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assesment Part I: Model development. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73–89, 1998.

ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M.; BERNHARDT, G. A comprehensive surface-groundwater flow model. **Journal of Hidrology,** vol.142, n. 1-4, p.47-69, 1993.

American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). **Guidelines for Calibrating , Validating , and Evaluating Hydrologic and Water Quality (H / WQ) Models**. ASABE 651. 2017.

ASADZADEH, M.; LEON, L.; YANG, W.; BOSCH, D. One-day offset in daily hydrologic modeling: An exploration of the issue in automatic model calibration. **Journal of Hydrology**, v. 534, p. 164–177, 2016.

ASCE. Criteria for evaluation of watershed models. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 119: 429- 442. 1993.

ASHRAF VAGHEFI, S.; MOUSAVI, S.; ABBASPOUR, K.; SRINIVASAN, R.; YANG, H. Analyses of the impact of climate change on water resources components, drought and wheat yield in semiarid regions: Karkheh River Basin in Iran. **Hydrological Processes**, Chichester, v.28, n.4, p.2018-2032, mar. 2013.

BAE, D.-H., JUNG, I.-W., LETTENMAIER, D.P. Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 GCM simulations of the Chungju Basin, Korea. **Journal of Hydrology**, 401, 90–105. 2011.

BAILEY, D. J. **Using SWAT (Soil Water and Assessment Tool) to Evaluate Streamflow Hydrology in a Small Mountain Watershed in the Sierra Nevada, Ca**. 2015. 68 p. Tese (Mestrado). Master of Arts in Geography, GIS Program. California State University, Northridge.

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT**. 2005. 148p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação de Física e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Mato Grosso. 2005.

BASHAR, K. E., MUTUA, F., MULUNGU, D.M.M, DEKSYOS, T., SHAMESLDIN, A. Appraisal study to select suitable Rainfall-Runoff model(s) for the Nile River Basin. **Paper presented at the International Conference of UNESCO Flanders, Sheikh, Egypt**. 2005.

BATHURST, J.C.; WICKS, J.M.; O'CONNEL, P.E. The SHE / SHESED basin scale water flow and sediment transport modelling system. In: SINGH, V.P. (Ed). **Computer models of watershed hydrology**. Highlands Ranch: Water Resources Publications, p. 563-594. 1995.

BECK, H. E.; van DIJK A.I.J.M; de ROO, A.; DUTRA, E.; FINK, G., ORTH, R.; SCHLLEKENS. J. Global evaluation of runoff from ten state-of-the-art hydrological models. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, p. 2881–2903, 2017.

BELL, S. N. **Implementing the Soil and Water Assessment Tool for the Puyallup River Watershed of Washington State: A Feasibility Assessment**. 2015.134p. Dissertação (Master of Environmental Studies) -The Evergreen State College.

BENLI, B., BRUGGEMAN, A., OWEIS, T.; USTUN, H. Performance of Penman-Montheith FAO56 in a semi-arid highland. **Environment. Journal of Irrigation and Drainage Engineering** 136 (11), 757–765. 2010.

BERGSTRÖM, S. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. **SMHI Report,** RHO 7. 1976.

BEVEN, K. Advice to a young hydrologist. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 20, p. 3578–3582, 2016.

BEVEN, K. J. **Rainfall-Runoff Modelling: the primer**. Second Edition. Lancaster University, UK. 2012.

BEVEN, K. How far can we go in distributed hydrological modelling? **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 5, n. 1, p. 1–12, 2001.

BEVEN, K. J., R. LAMB, P. F. QUINN, R. ROMANOWICZ, e J. FREER, TOPMODEL, In: V. P. Singh (Editor**), Computer Models of Watershed Hydrology**, Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO, pp. 627 -668, 1995.

BEVEN, K. J.: Changing ideas in hydrology—the case of physically- based models, **Journal of Hydrology**, 105, 157–172, 1989.

BEVEN, K. e M. J. KIRKBY, A physically based variable contributing area model of basin hydrology, **Hydrologic Sciences Bulletin**, 24, 43 -69, 1979.

BIERKENS, M. F. P. Global hydrology 2015: State, trends, and directions. **Water Resources Research**, n. February, p. 600–612, 2016.

BIERKENS, M. F. P.; BELL,V. A., BUREK, P., CHANEY, N., CONDON, L. E., DAVID, C. H., DE ROO, A., DÖLL, P., DROST, N., FAMIGLIETTI, J. S., FLÖRKE, M., GOCHIS, D. J., HOUSER, P., HUT, R., KEUNE, J., KOL- LET, S., MAXWELL, R. M., REAGER, J. T., SAMANIEGO, L., SUDICKY, E., SUTANUDJAJA, E. H., VAN DE GIESEN, N., WINSEMIUS, H.,WOOD, E. Hyper-resolution global hydrological modelling: what is next?. **Hydrological Processes**, 29, 310–320, 2015.

BONUMÁ, N.; REICHERT, J.; RODRIGUES, M.; MONTEIRO, J.; ARNLOD, J.; SRINIVASAN, R. Modeling surface hydrology, soil erosion, nutrient transport, and future scenarios with the ecohydrological swat model in brazilian watersheds and river basins. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.9, p.241-290, jul. 2015.

BONUMÁ, N. B.; ROSSI, C. G.; ARNOLD, J. G.; REICHERT, J. M.; MINELLA, J. P.; ALLEN, P. M.; VOLK, M. Simulating landscape sediment transport capacity by using a modified SWAT model. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.43, n.1, p.55-66, jan. 2014.

BONUMÁ, N.; ROSSI, C.; ARNOLD, J.; REICHERT, J.; PAIVA, E. Hydrology evaluation of the Soil and Water Assessment Tool considering measurement uncertainty for a small watershed in Southern Brazil. **Applied Engineering in Agriculture**, St Joseph, v.29, n.2, p.189-200, mar. 2013.

BORAH, D. K.; BERA, M. Watershed-Scale Hydrologic and Nonpoint-Source Pollution Models: Review of Mathematical Bases. **Transactions of the ASAE**, v. 46, n. 6, p. 1553–1566, 2003.

BRANDÃO, V. S.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. Infiltração da água no solo - 2a edição. 2. ed. Viçosa-MG: Editora UFV, 2004. v. 1. 98p.

BRESSIANI, D. D. A. **Coping with hydrological risks through flooding risk index, complex watershed modeling , different calibration techniques , and ensemble streamflow forecasting**. p. 200, 2016. Tese (Doutorado – Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Universidade de São Paulo.

BRESSIANI, D. de A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N. B.; MENDIONDO, E. M. Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, Roseville, v.8, n.3, p.9-35, may. 2015.

BRIGHENTI, T.; BONUMÁ, N.; CHAFFE, P. Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica Catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 53–64, 2016.

BRUTSAERT W. Hydrology: An Introduction. Cambridge University Press: Cambridge, U.K. 2005.

BUARQUE, D. C. **Simulação da geração e do transporte de sedimentos em grandes bacias : Estudo de caso do rio Madeira**. 2015. 182p. Tese (Doutorado – Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Pesquisas Hidráulicas.

BUTTS M. B.; PAYNE J. T.; KRISTENSEN M.; MADSEN H. An evaluation of the impact of model structure on hydrological modelling uncertainty for streamflow prediction. **Journal ofHydrology**, 298:242–266, 2004.

CHENG, Q. B.; REINHARDT-IMJELA, C.;CHEN, X.; SCHULTE, A.; JI, X. Improvement and comparison of the rainfall–runoff methods in SWAT at the monsoonal watershed of Baocun, Eastern China. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 8, p. 1460–1476, 2016.

CLARK, M. P.; BIERKENS, M.F.P.; SAMANIEGO, L.; WOODS, R.A.; UIJLENHOET, R.; BENNETT, K. E.; PAUWELS, V.R.N.; CAI, X.; WOOD, A.W. PETERS-LIDARD, C. D. The evolution of process-based hydrologic models: Historical challenges and the collective quest for physical realism. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 7, p. 3427–3440, 2017.

COLLISCHONN, W., ALLASIA, D., SILVA, B., TUCCI, C. The MGB-IPH model for large- scale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences** 52(5)878-895. 2007.

COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2001. 270p. Tese (Doutorado – Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Pesquisas Hidráulicas.

CORNELISSEN, T.; DIEKKRUGER, B.; GIERTZ, S. A Comparison of Hydrological Models for Assessing the Impact of Land Use and Climate Change on Discharge in a Tropical Catchment. **Journal of Hydrology**, v. 498, p. 221–236, 2013.

DAGGUPATI, P.; YEN, H.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G.; KEITZER, C. S.; SOWA, S. P. Impact of model development, calibration and validation decisions on hydrological simulations in West Lake Erie Basin. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 26, 2015.

DEVI, G. K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, v. 4, n. Icwrcoe, p. 1001–1007, 2015.

DI LUZIO, M.; ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R. Effect of GIS data quality on small watershed stream flow and sediment simulations. **Hydrological Processes**, v. 19, n. 3, p. 629–650, 2005.

DOOGE, J.C.I. The hydrologic cycle as a closed system. I**nternational Association of Scientific Hydrology**. Bulletin, 13:1, p.58-68. 1968.

DROOGERS, P. e ALLEN, R. G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions, **Irrig. Drain. Syst**., 16, 33–45, 2002.

DUDA, P. B., P. R. HUMMEL, A. S. DONIGIAN JR., J. C. IMHOFF. BASINS/HSPF: Model use, calibration, and validation. **Trans. ASABE** 55(4): 1523-1547. 2012.

FAN, F. M.; COELHO, V. R. **Manual Do Programa Super Manejo De Dados**. Versão

1.1. Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS. 2016

FATICHI, S., VIVONI, E. R., OGDEN, F. L., IVANOV, V. Y., MIRUS, B., GOCHIS, D., DOWNER, C. W., CAMPORESE, M., DAVISON, J. H., EBEL, B. An overview of current applications, challenges, and future trends in distributed process-based models in hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 537, p. 45–60, 2016.

FEKETE, B. M., LOOSER, U., PIETRONIRO, A.; ROBARTS, R. D. Rationale for monitoring discharge on the ground, **Journal of Hydrometeorology**, 13, 1977–1986, 2012.

FERRIGO, S. **Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – Estudo de caso da bacia do lago Descoberto – DF**. 2014. 165 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Universidade de Brasília. 2014.

FERRO, V., MINACAPILLI, M. Sediment delivery processes at basin scale. **Hydrological Sciences Journal** 40 (6), 703–717. 1995.

FIENEN, M., HUNT, R., KRABBENHOFT, D., Obtaining parsimonious hydraulic conductivity fields using head and transport observations: a Bayesian geostatistical parameter estimation approach. **Water Resources Research**. 45 (8), W08405. 2009.

FLEISCHMANN, A., SIQUEIRA, V., PARIS, A., COLLISCHONN, W., PAIVA, R., PONTES, P., CRÉTAUX, J-F., BERGÉ-NGUYEN, M., BIANCAMARIA, S., GOSSET, M., CALMANT, S., TANIMOUN, B. Modelling hydrologic and hydrodynamic processes in basins with large semi-arid wetlands. **Journal of Hydrology**, v. 561, p. 943–959, 2018.

FOGLIA, L., HILL, M.C., MEHL, S.W., BURLANDO, P., Sensitivity analysis, calibration, and testing of a distributed hydrological model using error-based weighting and one objective function. **Water Resources Research**. 45, W06427. 2009.

FREEZE, R. A. e HARLAN, R. L. Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model, **Journal of Hydrology**, 9, 237–258, 1969.

FUKUNAGA, D.C.; CECILIO, R.A.; ZANETTI, S.; OLIVEIRA, L.T.; CAIADO, M.A.C. Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. **Catena**. 2015; 125: 206-213.

FUKUNAGA, D. C. **Estimação de vazão em bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo**. 2012. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Departamento

de Engenharia Florestal e da Madeira, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2012.

GAO, C.; YAO, M. T.; WANG, Y. J.; ZHAI, J. Q.; BUDA, S.; FISCHER, T.; ZENG, X. F. e WANG, W. P. Hydrological model comparison and assessment: criteria from catchment scales and temporal resolution. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 10, p. 1941–1951, 2016.

GAREN, D.C., MOORE, D.S. Curve number hydrology in water quality modeling: uses, abuses, and future directions**. J. Am. Water Resour. Assoc**. 41 (2), 377–388. 2005.

GAVILAN, P., LORITE, I. J., TORNERO, S., e BERENGENA, J.: Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment, **Agr. Water Manage.,** 81, 257–281, 2006.

GEOBASES – Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo. Disponível em: https://geobases.es.gov.br/links-para-mapas. Acessado em 11 de Abril de 2018.

GEZA, M.; MCCRAY, J. E. Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions. **Journal of Environmental Management**, v. 88, n. 3, p. 393–406, 2008.

GOLMOHAMMADI, G.; PRASHER, S.; MADANI, A.; RUDRA, R. Evaluating Three Hydrological Distributed Watershed Models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. **Hydrology**, v. 1, n. 1, p. 20–39, 2014.

GOSLING, S., TAYLOR, R.G., ARNELL, N., TODD, M.C. A comparative analysis of projected impact of climate change on river runoff from global and catchment- scale hydrological models. **Hydrology and Earth System Sciences**. 15 (1), 279–294. 2011.

GUIMARÃES, C. F. Simulação hidrológica e hidrossedimentológica em uma bacia com reservatórios com o modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT). 2016. 114 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo. 2016.

GUPTA, H. V., SOROOSHIAN, S., YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. **J. Hydrol. Eng**., 4(2), 135-143. 1999.

HANNAH, D. M., DEMUTH, S., VAN LANEN, H. A. J., LOOSER, U., PRUD- HOMME, C., REES, G., STAHL, K., TALLAKSEN, L. M. Large-scale river flow archives: importance, current status and future needs, **Hydrological Processes**, 25, 1191–1200, 2011.

HARGREAVES, G. H., ASCE, F., e ALLEN, R. G.: History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation, **J. Irrig. Drain. E.-ASCE**, 129, 53–63, 2003.

HARMEL R.D., SMITH P.K., MIGLIACCIO K.W., CHAUBEY I., K. R. D.-M.; BENHAM B., SHUKLA S., MUÑOZ-CARPENA R., B. J. R. Evaluating, interpreting, and communicating performance of hydrologic/water quality models considering intended use: A review and recommendations. **Environmental Modelling & Software**. v. 21, p. 40–51, 2014.

HARMEL, R.D., SMITH, P.K., MIGLIACCIO, K.L. Modifying goodness-of-fit indicators to incorporate both measurement and model uncertainty in model calibration and validation. Trans. **ASABE** 53 (1), 55e63. 2010.

HARMEL, R.D., COOPER, R.J., SLADE, R.M., HANEY, R.L., ARNOLD, J.G. Cumulative uncertainty in measured streamflow and water quality data for small watersheds. Trans. **ASABE** 49 (3), 689e701. 2006.

HAVRYLENKO, S.B., BODOQUE, J.M., SRINIVASAN, R., ZUCARELLI, G.V., MERCURI, P. Assessment of the soil water content in the Pampas region using SWAT. **Catena**, v. 137, p. 298–309, 2016.

HUTTON, C.; WAGENER, T.; FREER, J.; HAN, D.; DUFFY, C.; ARHEIMER, B. Reply to comment by Melsen et al. on ‘‘Most computational hydrology is not reproducible, so is it really science?,’’ **Water Resour. Res.**, 53, 2570–2571. 2017.

IBGE - EMBRAPA - Mapa de Solos do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2001. Disponível em http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/mapa_solos.php. Acessado em 11 de Abril de 2018.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cobertura e uso da terra, 2007. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/informacoes-ambientais/cobertura-e-uso-da-terra/10867-cobertura-e-uso-da-terra.html?&t=downloads. Acessado em 11 de Abril de 2018.

Instituto Jones dos Santos Neves (IJSN) e Agência Estadual de Recursos Hídricos (AGERH). 2018.Diagnóstico e Prognóstico das condições de uso da água na bacia hidrográfica do Rio Itapemirim. Relatório da Etapa A - Diagnóstico e Prognóstico.

Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH). 2017. Manual expresso de calibração dos parâmetros do MGB-IPH.

JAJARMIZADEH, M.; SIDEK, L. M.; MIRZAI, M.; ALAGHMAND, S.; HARUN, S.; MAJID, M. R. Prediction of Surface Flow by Forcing of Climate Forecast System Reanalysis Data. **Water Resources Management**, v. 30, n. 8, p. 2627–2640, 2016.

JAJARMIZADEH, M.; HARUN, S.; SALARPOUR, M. A review on theoretical

consideration and types of models in hydrology. **Journal of Environmental Science and Technology**, v. 5, n. 5, p. 249–261, 2012.

JARDIM, P. F.; FLEISCHMANN, A. S.; SIQUEIRA, V. A.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; PELISON, D. **Manual de Exemplo de Aplicação do Modelo MGB-IPH 2017 Utilizando o IPH -Hydro Tools**. 90p. 2017

JENSEN, M.E., BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. Evapotranspiration and irrigation water requirement. **ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices** No. 70, 1st edition, pp. 332–333. 1990.

KAUFFELDT, A., WETTERHALL, F., PAPPENBERGER, F., SALAMON, P., THIELEN, J. Technical review of large-scale hydrological models for implementation in operational flood forecasting schemes on continental level, **Environmental Modelling & Software**, 75, 68–76, 2016.

KAY, A. L. e DAVIES, V. A.: Calculating potential evapora- tion from climate model data: A source of uncertainty for hydrological climate change impacts, **J. Hydrol**., 358, 221–239, 2008.

KEATING, E.H., DOHERTY, J., VRUGT, J.A., KANG, Q. Optimization and uncertainty assessment of strongly nonlinear groundwater models with high parameter dimensionality. **Water Resources Research**. 46 (10), W10517. 2010.

KHERDE, R. V. Rainfall runoff modelling – modellers guide. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 11, n. 3, p. 1900–1907, 2016.

KHORASHADI ZADEH, F.; NOSSENT, J.; VAN GRIENSVEN, A.; BAUWENS, W. A. two-step global sensitivity analysis of a SWAT model, using simple screening methods and advanced quantitative methods. **International SWAT conference 2015, June 18. - 26. 2015, Pula (CA), Sardinia - Italy**, p. 55, 2015.

KILONZO, F. N.; GRIENSVEN, A. V.; OBANDO, J.; LENS, P. Selecting a potential evapotranspiration (PET) method in the absence of essential climatic input data. **SWAT International Conference**, 2011.

KIM, N.W.; LEE, J. Enhancement of the channel routing module in SWAT. **Hydrological Processes**. 24, 96–107, 2010.

KINGSTON, D. G., TODD, M. C., TAYLOR, R. G., e THOMPSON, J. R.: Uncertainty in the estimation of potential evapotranspiration under climate change, **Geophys. Res. Lett.**, 36, L20403, 2009.

KIRCHNER, J.: Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology, Water Resour. Res., 42, W03S04, https://doi.org/10.1029/2005wr004362, 2006.

KLEMES, V. Operational testing of hydrological simulation models. **Hydrological Sciences Journal** V. 31 No. 1 pp. 13-24. 1986.

KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BÄSE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. **Advances in Geosciences**, v. 5, n. 89, p. 89–97, 2005.

LEGATES, D. R.; MCCABE Jr., G. J.: Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation, **Water Resources Research**, 35, 1, 233–241, 1999.

LETCHER, R.A., JAKEMAN, A.J., MERRITT, W.S., MCKEE, L.J., EYRE, B.D., BAGINSKA, B. Review of Techniques to Estimate Catchment Exports. EPA Technical Report 99/73. Environmental Protection Authority, Sydney http://www.environment.gov.au/epg/npi/pubs/ pubs/nswreport.pdf. 1999.

LEWARNE, M. **Setting up ArcSWAT hydrological model for the Verlorenvlei catchment**. 2009. 95 p. Disseração. Stellenbosch University.

LI, H.; XU, C. Y.; BELDRING, S. How much can we gain with increasing model complexity with the same model concepts? **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 858–871, 2015.

LI, Z.-J.; ZHANG, K. Comparison of Three GIS-Based Hydrological Models. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 13, n. 5, p. 364–370, 2008.

LIANG, X., e ZHENGHUI, X.: A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models, **Adv Water Resour**, 24, 1173-1193, 2001.

LIANG, X.; LETTENMAIER, D. P.; WOOD, E. F.; BURGES, S. J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. **Journal of Geophysical Research**. 99(7), 14415– 14428. 1994.

LIEW, M. W. VAN; ARNOLD, J. G.; GARBRECHT, J. D. HYDROLOGIC SIMULATION ON AGRICULTURAL WATERSHEDS: CHOOSING BETWEEN TWO MODELS. v. 46, n. 6, p. 1539–1551, 2003.

LINDSTRÖM, G., JOHANSSON, B., PERSSON, M., GARDELIN, M., BERGSTRÖM, S. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. **Journal of Hydrology**. 201, 272–288. 1997.

LINSLEY, R. K. e CRAWFORD, N. H. Computation of a synthetic streamflow record on a digital computer, International Association of Scientific Hydrology, 526–538, 1960.

LOPEZ-URREA, R., MARTIN, F.S.O., FABEIRO, C.; MORATALLA, A. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. **Agricultural Water Management** 85,15–26. 2006.

LUDWIG, R., MAY, I., TURCOTTE, R., VESCOVI, L., BRAUN, M., CYR, J.-F., FORTIN, L.-G., CHAUMONT, D., BINER, S., CHARTIER, I., CAYA, D., MAUSER, W., The role of hydrological model complexity and uncertainty in climate change impact assessment. **Advanced Geosciences**. 21, 63–71. 2009.

MELSEN, L., TEULING, A., TORFS, P., ZAPPA, M., MIZUKAMI, N., CLARK, M., UIJLENHOET, R. Representation of spatial and temporal variability in large-domain hydrological models: case study for a mesoscale pre-Alpine basin. **Hydrology and Earth System Sciences**, 20(6), 2207-2226. 2016.

MENDOZA, P. A., CLARK, M. P., BARLAGE, M., RAJAGOPALAN, B., SAMANIEGO, L., ABRAMOWITZ, G., GUPTA, H. Are we unnecessarily constraining the agility of complex process-based models?, **Water Resources Research.**, 51, 716–728, 2015.

MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. A review of erosion and sediment transport models. v. 18, p. 761–799, 2003.

MIGLIACCIO, K.W. e SRIVASTAVA, P. Hydrologic components of watershed-scale models. **Transactions of the ASABE**, 50(5), 1695-1703. 2007.

MOORE, R. e CLARKE, R. A distribution function approach to rainfall runoff modeling, **Water Resour. Res.,** 17(5), 1367–1382. 1981.

MONTEIRO, J. A. F; STRAUCH, M.; SRINIVASAN, R.; ABBASPOUR, K.; GUCKER, B. Accuracy of grid precipitation data for Brazil: application in river discharge modelling of the Tocantins catchment. **Hydrological Processes**, v. 30, p. 1419- 1430, 2016.

MOREIRA, L. L. **Análise de sensibilidade de parâmetros e de desempenho do modelo Soil And Water Assessment Tools (SWAT) na estimativa de vazões médias em bacias hidrográficas**. 2017. 110 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

MORIASI, D N; GITAU, M W; PAI, N; DAGGUPATI, P. Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria. **Natural Resources & Environmental Systems Community of ASABE**, v. 58, n. 6, p. 1763–1785, 2015.

MORIASI, D. N.; WILSON, B. N.; ARNOLD, J. G.; GOWDA, P. H. Hydrologic and water quality models: use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE** v. 55, n. 4, p. 1241–1247, 2012.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

MYLEVAGANAM, S. **Evaluation of scale issues in swat**. 102p. Master of Science. Texas A&M University. 2009.

NAJAFI, M.R., MORADKHANI, H., JUNG, I.W. Assessing the uncertainties of hydrologic model selection in climate change impact studies. **Hydrological Processes**. 25 (18), 2814–2826. 2011.

NARSIMLU, B.; GOSAIN, A. K.; CHAHAR, B. R.; SINGH, S. K.; SRIVASTAVA, P. K. SWAT Model Calibration and Uncertainty Analysis for Streamflow Prediction in the Kunwari River Basin, India, Using Sequential Uncertainty Fitting. **Environmental Processes**, v. 2, n. 1, p. 79–95, 2015.

NASH J.E., SUTCLIFFE J.E. River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 10, p. 282-290, 1970.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. **Soil and water assessment tool - Theoretical Documentation:** Version 2009. Temple: Blackland Research Center, Texas AgriLife Research, 2011. 647p.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R. Soil and Water Assessment Tool: Input / Output File Documentation Version 2009. 2010. 604 p.

NEITSCH, S. L., J. G. ARNOLD, J. R. KINIRY, R. SRINIVASAN, J. R. WILLIAMS. Soil and Water Assessment Tool, User Manual, Version 2000. Temple, Tex.: Grassland, Soil and Water Research Laboratory. 2002.

NGONGONDO, C.; XU, C.; TALLAKSEN, L.M.; ALEMAW, B. Evaluation of the FAO Penman–Montheith, Priestley–Taylor and Hargreaves models for estimating reference evapotranspiration in southern Malawi. **Hydrology Research**, v. 44, n. 4, p. 706, 2013.

NGUYEN, V.; DIETRICH, J.; UNIYAL, B.; TRAN, D. Verification and Correction of the Hydrologic Routing in the Soil and Water Assessment Tool. **Water**, v. 10, n. 10, p. 1419, 2018.

NIJSSEM, B.; LETTENMAIER, D. P.; LIANG, X.; WETZEL, S. W.; WOOD, E. F. Streamflow simulation for continental- scale river basins. **Water Resources Management**. Res. 33(4), 711–724, 1997.

OLIVEIRA, L. T. **Aplicação do modelo SWAT para simular vazões em uma bacia hidrográfica em Aracruz, ES**. 2014. 162 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo. 2014.

PANICONI, C.; PUTTI, M. Physically based modeling in catchment hydrology at 50: Survey and outlook. **Water Resources Research**, v. 51, n. 9, p. 7090–7129, 2015.

PERAZZOLI, M. Avaliação das mudanças climáticas e do uso do solo nas vazões e nos sedimentos da bacia do Ribeirão Concórdia, Lontras – SC. 2012. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro de Ciências Tecnológicas, Fundação Universidade Regional de Blumenal, Blumenal, SC, 2012.

PEREIRA, D. DOS R.;MARTINEZ, M.A.; DA SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT Model Part II: Simulation of hydrological variables and soil use scenarios. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 5, p. 149–163, 2016a.

PEREIRA, D. DOS R.;MARTINEZ, M.A.; DA SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 7, p. 14–37, 2016b.

PEREIRA, D. R.; MARTINEZ, M. A.; ALMEIDA, A. Q.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; ZONTA, J. H. Hydrological simulation using SWAT model in headwater basin in Southeast Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.34, n.4, p.789-799, jul./aug. 2014.

PEREIRA, D. R. dos. **Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT**. Tese de doutorado. Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, MG, 2013.

PEREIRA, A. R. e PRUITT, W. O. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. **Agricultural Water Management** 66, 251–257. 2004.

PERRIN C., MICHEL C., ANDRÉASSIAN V. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. **Journal of Hydrology**, 242: 275–301. 2001.

PFANNERSTILL, M.; GUSE, B.; FOHRER, N. Smart low flow signature metrics for an improved overall performance evaluation of hydrological models. **Journal of Hydrology**, v. 510, p. 447–458, 2014.

PISINARAS, V.; PETALAS, C.; GIKAS, G. D.; GEMITZI, A.; TSIHRINTZIS, V. A. Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). **Desalination**, v. 250, n. 1, p. 274–286, 2010.

POKHREL, P., GUPTA, H.V. On the ability to infer spatial catchment variability using streamflow hydrographs. **Water Resources Research**. 47. 2011.

PONTES, P. R. M.; FAN, FERNANDO M.; FLEISCHMANN, A. S.; DE PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C. SIQUEIRA, V. A.; JARDIM, P. F. SORRIBAS, M. V. COLLISCHONN, W. MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. **Environmental Modelling and Software**, v. 94, p. 1–20, 2017.

PONTES, P. R. M. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada da bacia do Prata**, Dissertação PhD, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 194 pp., 2016.

PONTES, L.M.; VIOLA, M.R; NAVES SILVA, M.L.; BISPO, D.F.A.; CURI, N. Hydrological modeling of tributaries of cantareira system, southeast brazil, with the swat model. **Eng. Agríc.**, v. 4430, n. 6, p. 1037–1049, 2016.

PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 888–904, 2015.

REED, S.; KOREN, V.; SMITH, M.; ZHANG, Z.; MOREDA, F.; SEO, D. J. Overall distributed model intercomparison project results. **Journal of Hydrology**, v. 298, n. 1–4, p. 27–60, 2004.

REFSGAARD, J. C.; KNUDSEN, J. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. **Water Resources Research**, v. 32, n. 7, p. 2189–2202, 1996.

ROCKWOOD, D. M. Streamflow synthesis and reservoir regulation, Engineering Studies Project 171 Technical Bulletin No. 22, US Army Engineer Division, North Pacific, Portland, Oregon, 1964.

RODRIGUES, D. B.; GUPTA, H. V.; MENDIONDO, E. M. A blue/green water-based accounting framework for assessment of water security. **Water Resources Research**, Washington, v.50, n.9, p.7187-7205, set. 2014.

ROMAGNOLI, M.; PORTAPILA, M.; RIGALLI, A.; MAYDANA, G.; BURGUÉS, M.; GARCÍA, C. M. Assessment of the SWAT model to simulate a watershed with limited available data in the Pampas region, Argentina. **Science of the Total Environment**, v. 596–597, p. 437–450, 2017.

ROSBJERG, D. e MADSEN, H. Concepts of Hydrologic Modeling, in: Encyclopedia of Hydrological Sciences, chap. 10, JohnWiley & Sons, 2006.

SAKKA, M. **Application and comparison of two analytical tools of decision support for the management of resources in a river basin in tunisia.** 2010. Tese PhD. Department of technology, engineering and environment and forest sciences. Tuscia University Of Viterbo.

SALLES, L. A. **Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pipiripau**. 2012. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília - DF.

SARTORI, A.; GENOVEZ, A. M.; LOMBARDI NETO, F. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos Parte 2 : Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 19–29, 2005.

SEMENOVA, O.; BEVEN, K. Barriers to progress in distributed hydrological modelling. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 8, p. 2074–2078, 2015.

SEVAT, E.; DEZETTER, A. Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modeling in a Sudanese savannah area. **Hydrological Sciences Journal**. 36(4): 307-330. 1991.

DA SILVA, P. G. **Simulação Do Fluxo Hídrico E Da Produção De Sedimento Da Bacia Do Rio Araranguá, Sc, a Partir Da Aplicação Do Modelo Hidrológico Swat**. 2011. 76p. Monografia (Graduação – Oceanografia) – Universidade do Vale do Itajaí.

SMITH, M.B., KOREN, V., ZHANG, Z., ZHANG, Y., REED, S.M., CUI, Z., MOREDA, F., COSGROVE, B.A., MIZUKAMI, N., ANDERSON, E.A. Results of the DMIP 2 Oklahoma experiments. **Journal of Hydrology**. 418–419, 17–48. 2012.

SMITH, M. B.; SEO, D. J.; KOREN, V. I.; REED, S. M.; ZHANG, Z.; DUAN, Q.; MOREDA, F.; CONG, S. The distributed model intercomparison project (DMIP): Motivation and experiment design. **Journal of Hydrology**, v. 298, n. 1–4, p. 4–26, 2004.

SMITH, M. B.; GEORGAKAKOS, K. P.; LIANG, X. The distributed model intercomparison project (DMIP). **Journal of Hydrology**, v. 298, n. 1–4, p. 1–3, 2004.

SINGH, V. P. Hydrologic modeling : progress and future directions. **Geoscience Letters**, 2018.

SINGH, J., KNAPP, H. V., DEMISSIE, M. Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. ISWS CR 2004-08. **Champaign, Ill.: Illinois State Water Survey**. 2004.

SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A.; JARDIM, P. F.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open-source environment. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 274–287, 2016.

SISAY, E.; HALEFOM, A.; KHARE, D.; SINGH, L.; WORKU, T. Hydrological modelling of ungauged urban watershed using SWAT model. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 3, n. 2, p. 693–702, 2017.

SITTERSON, J.; KNIGHTES, C.; PARMAR, R.; WOLFE, K.; MUCHE, M.; AVANT, B. An Overview of Rainfall-Runoff Model Types An Overview of Rainfall-Runoff Model Types. **EPA Report Number**, p. 0–29, 2017.

SOULIS, E. D., KOUWEN, N., PIETRONIRO, A., SEGLENIEKS, F. R., SNELGROVE, K. R., PELLERIN, P., SHAW, D. W.; MARTZ L. W. A framework for hydrological modelling In Mags. In: Prediction in Ungauged Basins: Approaches for Canada's Cold Regions (ed. by C. Spence, J. W. Pomeroy & A. Pietroniro). CWRA ACRH Press, Ontario, Canada. 2004.

SOUZA, R. DE; SANTOS, I. DOS; KOBIYAMA, M. O modelo SWAT como ferramenta para a gestão de recursos hídricos: avaliação de vazões de outorga na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro. **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 1–14, 2009.

SRINIVASAN, R.; ZHANG, X.; ARNOLD, J. Swat Ungauged: Hydrological Budget and Crop Yield Predictions in the Upper Mississippi River Basin. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 53, n. 5, p. 1533–1546, 2010.

SRIVASTAVA, P.; MCNAIR, J. N.; JOHNSON, T. E. Comparison of process-based and artificial neural network approaches for streamflow modeling in an agricultural watershed. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 42, n. 3, p. 545–563, 2006.

STAUDINGER, M.; STAHL, K.; SEIBERT, J.; CLARK, M. P.; TALLAKSEN, L. M. Comparison of hydrological model structures based on recession and low flow simulations. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 11, p. 3447–3459, 2011.

STEEFEL, C.I., VAN CAPPELLAN, P. Reactive transport modelling of natural systems. **Journal of Hydrology** 209, 1–7. 1998.

STRAUCH, M.; VOLK, M. SWAT plant growth modification for improved modeling of perennial vegetation in the tropics. **Ecological Modelling**, v. 269, p. 98–112, 2013.

STRAUCH, M.; BERNHOFER, C.; KOIDE, S.; VOLK, M.; LORZ, C.; MAKESCHIN, F. Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 414, p. 413-424, 2012.

TE LINDE, A. H.; AERTS, J.C.J.H.; HURKMANS, R. T.W. L.; EBERLE, M. Comparing model performance of two rainfall-runoff models in the Rhine basin using different atmospheric forcing data sets. **Hydrol. Earth Syst. Sci**, v. 12, p. 943–957, 2008.

TEGEGNE, G.; PARK, D. K.; KIM, Y. O. Comparison of hydrological models for the assessment of water resources in a data-scarce region, the Upper Blue Nile River Basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 14, n. October, p. 49–66, 2017.

TEIXEIRA, L. F. C. **Análise De Sensibilidade De Parâmetros Do Modelo Hidrológico Swat Em Função De Diferentes Características De Bacias Hidrográficas**. 2017. 132 p. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

TESHAGER, A.D.; GASSMAN, P.W.; SECCHI, S.; SCHOOF, J.T.; MISGNA, G. Modeling Agricultural Watersheds with the Soil and Water Assessment Tool (SWAT): Calibration and Validation with a Novel Procedure for Spatially Explicit HRUs. **Environmental Management**, v. 57, n. 4, p. 894–911, 2016.

THAMPI, S. G.; RANEESH, K. Y.; SURYA, T. V. Influence of scale on swat model calibration for streamflow in a river basin in the humid tropics. **Water Resources Management**, v. 24, p. 4567 – 4578, 2010.

THORSEN, M., REFSGAARD, J.C., HANSEN, S., PEBESMA, E., JENSEN, J.B., KLEESCHULTE, S. Assessment of uncertainty in simulation of nitrate leaching to aquifers at catchment scale. **Journal of Hydrology** 242, 210–227. 2001.

TONG, S. T. Y.; CHEN, W. Modeling the relationship between land use and surface water quality. **Journal of Environmental Management**, v. 66, n. 4, p. 377–393, 2002.

TRAMBAUER, P., MASKEYA, S.,WINSEMIUS, H.,WERNER, M., UHLENBROOK, S. A review of continental scale hydrological models and their suitability for drought forecasting in (sub-Saharan) Africa, **Physics and Chemistry of the Earth**, 66, 16–26, 2013.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; COLLISCHONN, W.; DA SILVA, P. L. D.; DE OLIVEIRA, G. S. Long-term flow forecasts based on climate and hydrologic modeling: Uruguay River basin. **Water Resources Research**, v. 39, n. 7, p. 1–11, 2003.

UFRS-HGE. O que é o MGB?. Disponível em: https://www.ufrgs.br/hge/mgb/o-que-e/. Acesso em 20/06/2018.

ULLRICH, A.; VOLK, M. Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 8, p. 1207–1217, 2009.

U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic aspects of flood warning—preparedness programs. Technical Letter 1110-2-540, Washington, DC. 1996.

VAN STEENBERGEN, N., WILLEMS, P. Method for testing the accuracy of rainfall–runoff models in predicting peak flow changes due to rainfall changes, in a climate changing context. **Journal of Hydrology**. 414–415, 425–434. 2012.

VANROLLEGHEM, P.A.; INSEL, G.; PETERSEN, B.; SIN, G.; PAUW, D.; NOPENS, I.; DOVERMANN, H.; WEIJERS, S.; GERNAEY, K. A comprehensive model calibration procedure for activated sludge models. **Proc Water Environ Fed** 2003:210–237. 2003.

VANSTEENKISTE, T.; TAVAKOLI, M.; VAN STEENBERGEN, N.; DE SMEDT, F.; BATELAAN, O.; PEREIRA, F.; WILLEMS, P. Intercomparison of five lumped and distributed models for catchment runoff and extreme flow simulation. **Journal of Hydrology**, v. 511, p. 335–349, 2014.

VANSTEENKISTE, T.; TAVAKOLI, M.; NTEGEKA, V.; WILLEMS, P.; DE SMEDT , F.; BATELAAN, O. Climate change impact on river flows and catchment hydrology : a comparison of two spatially distributed models. **Hydrological Processes** v. 3662, n. August 2012, p. 3649–3662, 2013.

VAZE, J., JORDAN, P., BEECHAM, R., FROST, A., SUMMERELL, G. Guidelines for Rainfall- Runoff Modelling: Towards best practice model application (pp. 47). 2012.

VELÁZQUEZ, J.A., SCHMID, J., RICARD, S., MUERTH, M.J., GAUVIN ST-DENIS, B., MINVILLE, M., CHAUMONT, D., CAYA, D., LUDWIG, R., TURCOTTE, R. An ensemble approach to assess hydrological models' contribution to uncertainties in the analysis of climate change impact on water resources. **Hydrology and Earth System Sciences**. 17, 565–578. 2012.

VENTURA, F., SPANO, D., DUCE, P.; SNYDER, R. L. An evaluation of common evapotranspiration equations. **Irrigation Science** 18, 163–170. 1999.

VILAYSANE, B.; TAKARA, K.; LUO, P.; AKKHARATH, I.; DUAN, W. Hydrological Stream Flow Modelling for Calibration and Uncertainty Analysis Using SWAT Model in the Xedone River Basin, Lao PDR. **Procedia Environmental Sciences**, v. 28, n. SustaiN 2014, p. 380–390, 2015.

VOGEL, R. M., U. LALL, X. CAI, B. RAJAGOPALAN, P. K. WEISKEL, R. P. HOOPER, AND N. C. MATALAS. Hydrology : The interdisciplinary science of water. **Water Resour. Res**. p. 4409–4430, 2015.

WANG, L., KOIKE, T., YANG, K., YEH, P. J.F. Assessment of a distributed biosphere hydrological model against streamflow and MODIS land surface temperature in the upper Tone River Basin, **J. Hydrol.,** 377, 21–34. 2009.

WATSON I.; BURNETT AD. Hydrology: An environmental approach - Theory and applications of ground water and surface water for engineers and geologists. Boca Raton: Lewis Publishers. 1995.

WHITE, M.J., HARMEL, R.D., ARNOLD, J.G., & WILLIAMS, J.R. SWAT Check: A Screening Tool to Assist Users in the Identification of Potential Model Application Problems. **Journal of Environment Quality**, v. 43, n. 1, p. 208, 2014.

WILLIAMS, J. R. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. **Trans. ASAE** 12(1): 100-103. 1969.

WINCHELL, M.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Effects Of Radar-Estimated Precipitation Uncertainty On Different Runoff-Generation Mechanisms. **Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona**. 2018.

WINCHELL, M.; SRINIVASAN, R.; DI LUZIO, M.; ARNOLD, J. G. **Arcswat Interface for SWAT2012: User,s Guide**. Blackland Research And Extension Center Texas Agrilife Research. 2013

WOOD, E. F.; LETTENMAIER, D. P.; ZARTARIAN, V. G. A land surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models. **Journal of Geophysical Research**. 97(3), 2717–2728. 1992.

WU, Y.; CHEN, J. Simulation of nitrogen and phosphorous loads in the Dongjiang river basin in shouth China using SWAT. **Frontiers of Earth Science**, v. 3, n. 3, p. 273-278, 2009.

YANG, D.; HERATH, S.; MUSIAKE, K. Comparison of different distributed hydrological models for characterization of catchment spatial variability. **Hydrological Processes**, v. 14, n. 3, p. 403–416, 2000.

YANG J, REICHERT P, ABBASPOUR K, XIA J, YANG H. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. J Hydrol 358:1–23. 2008.

YAPO, P. O.; GUPTA, H. V. e SOROOSHIAN, S. Multi-objective global optimization for hydrologic models. **Journal of Hydrology**, 204, 83-97 pp. 1998.

YE, Y., SONG, X.M., ZHANG, J.Y., KONG, F.Z., MA, G.W. Parameter identification and calibration of the Xin'anjiang model using the surrogate modeling approach. **Frontiers of Earth Science**, 8 (2), 264–281. 2014.

ZHANG, D.; CHEN, X.; YAO, H.; LIN, B. Improved calibration scheme of SWAT by separating wet and dry seasons. **Ecological Modelling**, v. 301, p. 54–61, 2015.

ZHANG, P.; LIU, R.; BAO, Y.; WANG, J.; YU, W.; SHEN, Z. Uncertainty of SWAT model at different DEM resolutions in a large mountainous watershed. **Water Research**, Amsterdam, v.53, p.132-144, apr. 2014.

ANEXOS

ANEXO A – USOS DO SOLO

Tabela A1 - Reclassificação do uso do solo para aplicação dos modelos

USO SOLO	Área	Reclassificação MGB	Reclassificação SWAT
Pastagem	43,86%	Pastagem	Pasture
Mata Nativa	16,21%	Floresta	Forest Evergreen
Cultivo Agrícola - Café	14,17%	Agricultura	Coffe
Mata Nativa em Estágio Inicial de Regeneração	5,36%	Floresta	Forest-Mixed
Macega	4,89%	Pastagem	Pasture
Afloramento Rochoso	3,64%	Urbano	Barren
Outros	2,46%	Agricultura	Agricultural land-generic
Reflorestamento - Eucalipto	2,04%	Floresta	Forest-mixed
Cultivo Agrícola - Outros Cultivos Temporários	1,40%	Agricultura	Agricultural land-generic
Solo Exposto	1,04%	Urbano	Barren
Cultivo Agrícola - Cana-De-Açúcar	1,00%	Agricultura	Agricultural land-generic
Área Edificada	0,70%	Urbano	Barren
Campo Rupestre/Altitude	0,64%	Pastagem	Agricultural land-generic
Brejo	0,49%	Água	Water
Cultivo Agrícola - Outros Cultivos Permanentes	0,45%	Agricultura	Agricultural land-generic
Massa D'Água	0,44%	Água	Water
Reflorestamento - Pinus	0,37%	Floresta	Forest-mixed
Área entre 25% e 10% de ocupação por estabeleci	0,23%	Urbano	Barren
Cultivo Agrícola - Banana	0,19%	Agricultura	Agricultural land-generic
Extração Mineração	0,12%	Urbano	Barren
Cultivo Agrícola - Abacaxi	0,07%	Agricultura	Agricultural land-generic
Lavouras permanentes	0,05%	Agricultura	Agricultural land-generic

(conclusão)

USO SOLO	Área	Reclassificação MGB	Reclassificação SWAT
Cultivo Agrícola - Coco-Da-Baía	0,04%	Agricultura	Agricultural land-generic
Restinga	0,04%	Pastagem	Agricultural land-generic
Usos diversificados	0,04%	Agricultura	Agricultural land-generic
Reflorestamento - Seringueira	0,03%	Floresta	Forest-mixed
Pastagens + Lavouras	0,03%	Pastagem	Pasture
Mangue	0,02%	Água	Water
Lavouras	0,003%	Agricultura	Agricultural Land-Generic
Área urbanizada	0,002%	Urbano	Barren
Pastagens plantadas	0,0002%	Pastagem	Pasture

Fonte: o autor.

ANEXO B - PARÂMETROS RELATIVOS À VEGETAÇÃO

Tabela B1 - Valores do parâmetro “albedo” (adimensional) para aplicação do MGB

CRH / Mês	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
PastProf	0,2	0,2	0,2	0,21	0,2	0,23	0,24	0,25	0,23	0,22	0,2	0,2
PastRas	0,2	0,2	0,2	0,21	0,2	0,23	0,24	0,25	0,23	0,22	0,2	0,2
ForeProf	0,12	0,12	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12
ForeRas	0,12	0,12	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12
AgriProf	0,2	0,2	0,2	0,21	0,2	0,23	0,24	0,25	0,23	0,22	0,2	0,2
AgriRas	0,2	0,2	0,2	0,21	0,2	0,23	0,24	0,25	0,23	0,22	0,2	0,2
Urban	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Water	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

Fonte: o autor.

Tabela B2 - Valores do parâmetro “altura média da vegetação” (m) para aplicação do MGB

CRH / Mês	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
PastProf	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
PastRas	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
ForeProf	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
ForeRas	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
AgriProf	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
AgriRas	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Urban	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Water	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Fonte: o autor.

Tabela B3 - Valores do parâmetro “resistência superficial” (s/m) para aplicação do MGB

CRH / Mês	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
PastProf	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
PastRas	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
ForeProf	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
ForeRas	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
AgriProf	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
AgriRas	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Urban	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Water	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: o autor.

Tabela B4 - Valores do parâmetro “índice de área foliar” (m^2/m^2) para aplicação do MGB

CRH / Mês	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
PastProf	4	4	3	3	2	2	1	2	3	3	3	4
PastRas	4	4	3	3	2	2	1	2	3	3	3	4
ForeProf	9	9	8	8	7	6	6	6	6	7	8	9
ForeRas	9	9	8	8	7	6	6	6	6	7	8	9
AgriProf	6	6	5	4	3	2	2	2	2	3	4	5
AgriRas	6	6	5	4	3	2	2	2	2	3	4	5
Urban	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Water	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fonte: o autor.

ANEXO C – TIPOS DE SOLO

Tabela C1 - Reclassificação do tipo do solo para aplicação dos modelos

TIPO SOLO	Área	Reclassificação MGB	Reclassificação SWAT
CXbd1 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico + Latossolo Amarelo Distrófico típico	8,24%	Raso	Cambissolo
NVe - Nitossolo Vermelho Eutrófico típico + Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico	6,32%	Profundo	Nitossolo
RLde1 - Neossolo Litólico Distrófico (e Eutrófico) + Afloramento Rochoso	5,87%	Raso	Neossolo
CXbd4 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico + Latossolo Amarelo Distrófico típico + Afloram	5,78%	Raso	Cambissolo
CXbd4 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico + Latossolo Amarelo Distrófico típico + Afloram	5,63%	Raso	Cambissolo
LAd1 - Latossolo Amarelo Distrófico típico	5,48%	Profundo	Latossolo
CXbd4 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico + Latossolo Amarelo Distrófico típico + Afloram	4,41%	Raso	Cambissolo
MTo2 - Chernossolo Argilúvico Órtico + Argissolo Vermelho Eutrófico nitossólico	3,64%	Profundo	Chernossolo
PVAd1 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (e abrúptico)	3,46%	Profundo	Argissolo
PVe6 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico + Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico	3,10%	Profundo	Argissolo
LAd10 - Latossolo Amarelo Distrófico típico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico	2,98%	Profundo	Latossolo
LAd10 - Latossolo Amarelo Distrófico típico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico	2,85%	Profundo	Latossolo
NVe - Nitossolo Vermelho Eutrófico típico + Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico	2,82%	Profundo	Nitossolo
LAd6 - Latossolo Amarelo Distrófico típico + Argissolo Amarelo distrófico típico	2,61%	Profundo	Latossolo
PVe6 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico + Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico	2,13%	Profundo	Argissolo
RLde1 - Neossolo Litólico Distrófico (e Eutrófico) + Afloramento Rochoso	2,06%	Raso	Neossolo
PVe4 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico + Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico	2,04%	Profundo	Argissolo
RYbd3 - Neossolo Flúvico Tb Distrófico Típico + Gleissolo Melânico Tb Distrófico Típico + Glei	1,95%	Raso	Neossolo

(continuação)

TIPO_SOLO	Área	Reclassificação MGB	Reclassificação SWAT
LAd7 - Latossolo Amarelo Distrófico típico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico	1,15%	Profundo	Latossolo
LAd9 - Latossolo Amarelo Distrófico típico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico	1,14%	Profundo	Latossolo
LAd9 - Latossolo Amarelo Distrófico típico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico	1,14%	Profundo	Latossolo
CHa1 - Cambissolo Húmico Alumínico típico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico	1,09%	Raso	Cambissolo
PVe1 - Argissolo Vermelho Eutrófico abrúptico + Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico	1,08%	Profundo	Argissolo
LAd1 - Latossolo Amarelo Distrófico típico	1,03%	Profundo	Latossolo
PVe2 - Argissolo Vermelho Eutrófico nitossólico + Afloramento Rochoso	0,98%	Profundo	Argissolo
LAd9 - Latossolo Amarelo Distrófico típico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico	0,96%	Profundo	Latossolo
LAd7 - Latossolo Amarelo Distrófico típico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico	0,90%	Profundo	Latossolo
CHa2 - Associação complexa de: Cambissolo Húmico Alumínico típico + Neossolo Litólico Húmico	0,83%	Raso	Cambissolo
PVd - Argissolo Vermelho Distrófico típico	0,79%	Profundo	Argissolo
PVe4 - Argissolo Vermelho Eutrófico típico + Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico	0,75%	Profundo	Argissolo
PVe2 - Argissolo Vermelho Eutrófico nitossólico + Afloramento Rochoso	0,68%	Profundo	Argissolo
Ekg - Espodossolo Humilúvico Hidromórfico espessoarênico + Neossolo Quartzarênico hidromórfico	0,67%	Raso	Espodossolo
LAd7 - Latossolo Amarelo Distrófico típico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico	0,66%	Profundo	Latossolo
PVAd2 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico	0,64%	Profundo	Argissolo

(conclusão)

TIPO_SOLO	Área	Reclassificação MGB	Reclassificação SWAT
RLe - Neossolo Litólico Eutrófico típico + Argissolo Vermelho Eutrófico típico	0,62%	Raso	Neossolo
LAd7 - Latossolo Amarelo Distrófico típico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico	0,61%	Profundo	Latossolo
PAdx4 - Argissolo Amarelo Distrocoeso típico (e abrúptico) + Latossolo Amarelo Distrocoeso típico	0,60%	Profundo	Argissolo
Latossolo Vermelho-Amarelo	0,53%	Profundo	Latossolo
LAd7 - Latossolo Amarelo Distrófico típico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico	0,38%	Profundo	Latossolo
LAd7 - Latossolo Amarelo Distrófico típico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico	0,28%	Profundo	Latossolo
RLd - Neossolo Litólico Distrófico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico	0,24%	Raso	Neossolo
RLd - Neossolo Litólico Distrófico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico	0,21%	Raso	Neossolo
NVe - Nitossolo Vermelho Eutrófico típico + Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico	0,18%	Profundo	Nitossolo
PAdx6 - Argissolo Amarelo Distrocoeso típico (e abrúptico) + Latossolo Amarelo Distrocoeso típico	0,18%	Profundo	Argissolo
LAd7 - Latossolo Amarelo Distrófico típico + Cambissolo HÁPLICO Tb Distrófico típico	0,14%	Profundo	Latossolo
LAd7 - Latossolo Amarelo Distrófico típico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico	0,09%	Profundo	Latossolo
LAd12 - Latossolo Amarelo Distrófico típico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico	0,09%	Profundo	Latossolo
RLe - Neossolo Litólico Eutrófico típico + Argissolo Vermelho Eutrófico típico	0,07%	Raso	Neossolo
RLd - Neossolo Litólico Distrófico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico	0,02%	Raso	Neossolo
LAd10 - Latossolo Amarelo Distrófico típico + Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico	0,01%	Profundo	Latossolo
Cambissolo Háplico	0,005%	Raso	Cambissolo
Latossolo Vermelho-Amarelo	0,00003%	Profundo	Latossolo
Argilossolo Vermelho	0,00001%	Profundo	Argissolo

Fonte: o autor.

ANEXO D – PARÂMETROS DE TIPO DE SOLO

Tabela D1 - Valores de parâmetros relativos aos tipos de solo para aplicação do SWAT

Parâmetro	Camada	Tipo de solo						
		Neossolo	**Latossolo**	**Argissolo**	**Cambissolo**	**Chernossolo**	**Nitossolo**	**Espodossolo**
NLAYERS		2	4	3	5	4	4	5
HYDGRP		D	A	B	C	B	A	C
SOL_ZMX (mm)		-	1960	1300	1100	1400	1500	780
ANION_EXCL		0,5	0,5	0,32	0,47	0,33	0,5	0,5
SOL_Z (mm)	1	150	200	200	300	130	120	100
	2	700	400	550	600	530	320	250
	3	-	1600	1300	800	960	700	400
	4	-	1960	-	1100	1400	1500	590
	5	-	-	-	1170	-	-	780
SOL_BD (g/cm3)	1	1,7	1,14	1,7	1,6	1,6	1,29	1,16
	2	1,7	1,14	1,7	1,4	1,6	1,06	1,3
	3	-	1,03	1,7	1,4	1,5	0,96	1,5118
	4	-	1,15	-	1,8	1,5	0,96	1,5454
	5	-	-	-	1,4	-	-	1,64
SOL_AWC (mmH2O/mmSolo)	1	0,12	0,18	0,4	0,15	1,4	0,175	0,1434
	2	0,12	0,25	0,4	0,18	1,2	0,175	0,1003
	3	-	0,24	0,7	0,18	1,4	0,175	0,0577
	4	-	0,24	-	0,18	1,4	0,175	0,042
	5	-	-	-	0,18	-	-	0,1146
SOL_K (mm/hr)	1	20	75	90	12,5	32,5	40	15,0494
	2	20	50	90	12,5	12,5	30	6,3177
	3	-	19	40	12,5	12,5	25	63,2009

(continuação)

Parâmetro	**Camada**	**Tipo de solo**

		Neossolo	Latossolo	Argissolo	Cambissolo	Chernossolo	Nitossolo	Espodossolo
	4	-	19	-	12,5	12,5	30	96,5205
	5	-	-	-	12,5	-	-	0,2762
SOL_CBN (%)	1	0,9	1,36	1,3	1,4	1,7	1,5	8,8
	2	0,9	0,64	0,6	0,6	1,3	0,85	1,81
	3	-	0,3	0,3	0,4	0,5	0,85	2,01
	4	-	0,2	-	0,4	0,6	0,59	0,88
	5	-	-	-	0,3	-	-	0,64
CLAY (%)	1	17,86	38	11,7	36,3	13,7	49	32
	2	21,36	56	18,8	34	13,3	67	29
	3	-	56,5	20,8	28,4	23	81	10
	4	-	56	-	26,8	27,7	80	6
	5	-	-	-	27	-	-	47
SILT (%)	1	20,68	7	18,1	18	56,7	36	25
	2	23,14	5	17,2	35,7	46	24	13
	3	-	6	18,3	37,7	68,1	13	7
	4	-	5	-	43,7	67,4	13	4
	5	-	-	-	39,3	-		6
SAND (%)	1	55,46	55	70,2	93,4	29,6	15	43
	2	44,5	39	64	30,3	40,7	9	58
	3	-	37,5	60,9	33,9	8,9	6	83
	4	-	39	-	29,5	14,95	7	90
	5	-	-	-	33,7	-	-	47
ROCK (%)	1	6	0	0	0	0	0	0
	2	11	0	0	0	0	0	2
	3	-	0	0	0	0	0	2
	4	-	0	-	0	0	0	3
	5	-	-	-	0	-	-	1

(conclusão)

Parâmetro	Camada	Tipo de solo						
		Neossolo	**Latossolo**	**Argissolo**	**Cambissolo**	**Chernossolo**	**Nitossolo**	**Espodossolo**
SOL_ALB	1	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,15	0,0014
	2	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,15	0,1727
	3	-	0,15	0,15	0,15	0,16	0,15	0,1505
	4	-	0,15	-	0,15	0,15	0,15	0,3275
	5	-	-	-	0,15	-	-	0,3863
USKE_K (0,013 t m² hr m-3 t-1 cm-1)	1	0,17	0,13	0,14	0,05	0,16	0,13	0,1172
	2	0,16	0,14	0,15	0,16	0,18	0,13	0,1085
	3	-	0,14	0,16	0,17	0,27	0,13	0,0792
	4	-	0,14	-	0,18	0,25	0,13	0,0717
	5	-	0,14	-	0,24	-	-	0,1016

Fonte: o autor.

Tabela D2 - Valores relativos ao uso do solo antes da calibração por Classe de Resposta Hidrológica para aplicação do MGB

CRH / Parâmetro	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
PastProf	700	0,4	2	10	0,6	0	0,1
PastRas	400	0,4	1,2	10	0,6	0	0,1
ForeProf	700	0,4	2	10	0,6	0	0,1
ForeRas	400	0,4	1,2	10	0,6	0	0,1
AgriProf	700	0,4	2	10	0,6	0	0,1
AgriRas	400	0,4	1,2	10	0,6	0	0,1
Urban	100	0,5	0,2	10	0,6	0	0,1
Water	0	0	0	0	0	0	0
CS	10						
CI	100						
CB	1500						
QB	0,01						

Fonte: o autor.

Tabela D3 - Valores relativos ao uso do solo na Subbacia 01 (Mini 101) após calibração por Classe de Resposta Hidrológica para aplicação do MGB

CRH / Parâmetro	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
PastProf	900	0,15	4	20	0,6	0	0,1
PastRas	700	0,15	3,5	20	0,6	0	0,1
ForeProf	900	0,15	4	20	0,6	0	0,1
ForeRas	700	0,15	3,5	20	0,6	0	0,1
AgriProf	900	0,15	4	20	0,6	0	0,1
AgriRas	700	0,15	3,5	20	0,6	0	0,1
Urban	500	0,5	3	20	0,6	0	0,1
Water	0	0	0	0	0	0	0
CS	19						
CI	150						
CB	4000						
QB	0,1						

Fonte: o autor.

Tabela D4 - Valores relativos ao uso do solo na Subbacia 03 (Mini 96) após calibração por Classe de Resposta Hidrológica para aplicação do MGB

CRH / Parâmetro	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
PastProf	100	0,7	3,5	25	0,67	0	0,1
PastRas	100	0,7	3	25	0,67	0	0,1
ForeProf	100	0,7	3,5	25	0,67	0	0,1
ForeRas	100	0,7	3	25	0,67	0	0,1
AgriProf	100	0,7	3,5	25	0,67	0	0,1

(conclusão)

CRH / Parâmetro	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
AgriRas	100	0,7	3	25	0,67	0	0,1
Urban	100	0,5	0,2	25	0,67	0	0,1
Water	0	0	0	0	0	0	0
CS	12						
CI	70						
CB	1200						
QB	0,01						

Fonte: o autor.

Tabela D5 – Valores relativos ao uso do solo na Subbacia 05 (Mini 104) após calibração por Classe de Resposta Hidrológica para aplicação do MGB

CRH / Parâmetro	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
PastProf	800	0,4	1	7	0,6	0	0,1
PastRas	600	0,4	0,5	7	0,6	0	0,1
ForeProf	800	0,4	1	7	0,6	0	0,1
ForeRas	600	0,4	0,5	7	0,6	0	0,1
AgriProf	800	0,4	1	7	0,6	0	0,1
AgriRas	600	0,4	0,5	7	0,6	0	0,1
Urban	100	0,5	0,1	7	0,6	0	0,1
Water	0	0	0	0	0	0	0
CS	18						
CI	70						
CB	700						
QB	0,01						

Fonte: o autor.

Tabela D6 – Valores relativos ao uso do solo na Subbacia 02 (Mini 105) após calibração por Classe de Resposta Hidrológica para aplicação do MGB

CRH / Parâmetro	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
PastProf	800	0,3	3	10	0,6	0	0,1
PastRas	550	0,3	1,5	10	0,6	0	0,1
ForeProf	800	0,3	3	10	0,6	0	0,1
ForeRas	550	0,3	1,5	10	0,6	0	0,1
AgriProf	800	0,3	3	10	0,6	0	0,1
AgriRas	550	0,3	1,5	10	0,6	0	0,1
Urban	100	0,5	0,2	10	0,6	0	0,1
Water	0	0	0	0	0	0	0
CS	16						

(conclusão)

Parâmetro	
CI	100
CB	1500
QB	0,01

Fonte: o autor.

Tabela D7 - Valores relativos ao uso do solo na Subbacia 06 (Mini 108) após calibração por Classe de Resposta Hidrológica para aplicação do MGB

CRH / Parâmetro	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
PastProf	850	0,4	2	10	0,6	0	0,1
PastRas	700	0,4	1,2	10	0,6	0	0,1
ForeProf	850	0,4	2	10	0,6	0	0,1
ForeRas	700	0,4	1,2	10	0,6	0	0,1
AgriProf	850	0,4	2	10	0,6	0	0,1
AgriRas	700	0,4	1,2	10	0,6	0	0,1
Urban	200	0,5	0,2	10	0,6	0	0,1
Water	0	0	0	0	0	0	0
CS	18						
CI	100						
CB	1300						
QB	0,01						

Fonte: o autor.

Tabela D8 – Valores relativos ao uso do solo na Subbacia 04 (Mini 114) após calibração por Classe de Resposta Hidrológica para aplicação do MGB

CRH / Parâmetro	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
PastProf	700	0,4	2	10	0,6	0	0,1
PastRas	400	0,4	1,2	10	0,6	0	0,1
ForeProf	700	0,4	2	10	0,6	0	0,1
ForeRas	400	0,4	1,2	10	0,6	0	0,1
AgriProf	700	0,4	2	10	0,6	0	0,1
AgriRas	400	0,4	1,2	10	0,6	0	0,1
Urban	100	0,5	0,2	10	0,6	0	0,1
Water	0	0	0	0	0	0	0
CS	10						
CI	100						
CB	1500						
QB	0,01						

Fonte: o autor.

Tabela D9 – Valores relativos ao uso do solo na Subbacia 07 (Mini 128) após calibração por Classe de Resposta Hidrológica para aplicação do MGB

CRH / Parâmetro	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
PastProf	950	0,3	1,4	7	0,6	0	0,1
PastRas	800	0,3	0,8	7	0,6	0	0,1
ForeProf	950	0,3	1,4	7	0,6	0	0,1
ForeRas	800	0,3	0,8	7	0,6	0	0,1
AgriProf	950	0,3	1,4	7	0,6	0	0,1
AgriRas	800	0,3	0,8	7	0,6	0	0,1
Urban	400	0,5	0,2	7	0,6	0	0,1
Water	0	0	0	0	0	0	0
CS	20						
CI	100						
CB	1300						
QB	0,01						

Fonte: o autor.

ANEXO E – VAZÕES MÉDIAS, MÁXIMAS E MÍNIMAS - PERÍODO DE CALIBRAÇÃO

Tabela E1 – Média, máximo e mínimo das vazões diárias (m³/s) e erro médio para cada ano do período de calibração na sub-bacia delimitada pelo posto 57400000

57400000 - Itaici

Ano	Média					Máximo					Mínimo				
	Obs.	SWAT	Erro SWAT	MGB	Erro MGB	Obs.	SWAT	Erro SWAT	MGB	Erro MGB	Obs.	SWAT	Erro SWAT	MGB	Erro MGB
2002	18,61	18,55	-0,37%	22,15	18,99%	101,04	110,40	9,26%	149,60	48,06%	4,76	6,89	44,79%	6,17	29,66%
2003	15,60	16,69	6,99%	16,71	7,14%	140,11	171,10	22,12%	182,32	30,12%	4,55	6,68	46,88%	3,21	-29,55%
2004	20,96	22,93	9,44%	26,00	24,08%	147,38	267,80	81,71%	246,57	67,30%	4,69	7,09	51,07%	4,86	3,72%
2005	26,01	24,60	-5,44%	27,13	4,31%	144,54	169,30	17,13%	170,14	17,71%	6,90	8,18	18,57%	7,36	6,73%
2006	19,42	17,80	-8,33%	18,70	-3,70%	196,81	147,70	-24,95%	190,23	-3,35%	5,16	7,17	38,93%	5,15	-0,11%
2007	20,33	19,81	-2,55%	21,43	5,44%	97,17	142,80	46,96%	160,92	65,61%	5,16	7,20	39,57%	4,11	-20,36%
Erro médio	-	-	5,52%	-	10,61%	-	-	33,69%	-	38,69%	-	-	39,97%	-	15,02%

Figura E1 – Comparação das vazões médias, máximas e mínimas observadas e simuladas pelos modelos- Estação fluviométrica 57400000 - Período de calibração

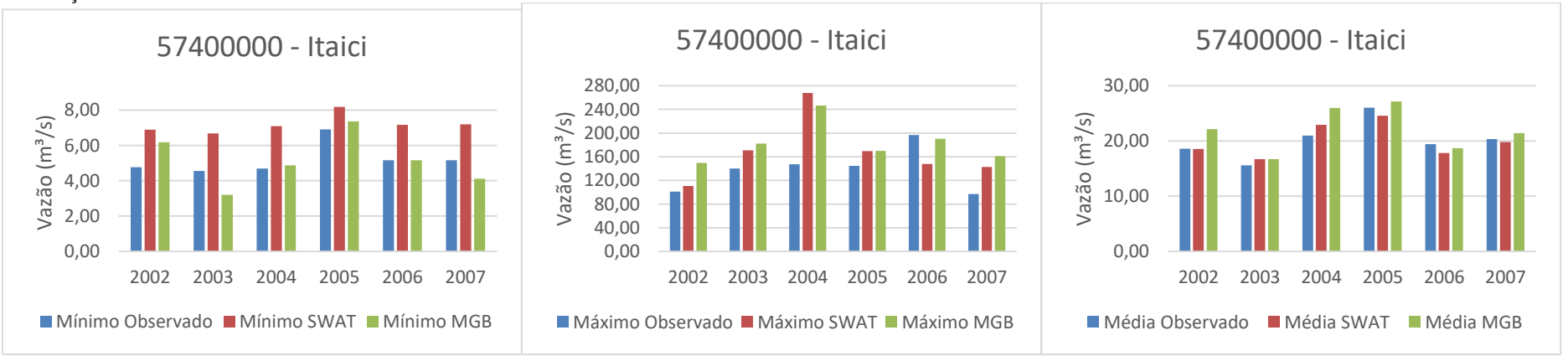


Tabela E2 – Média, máximo e mínimo das vazões diárias (m³/s) e erro médio para cada ano do período de calibração na sub-bacia delimitada pelo posto 57420000

57420000 - Ibitirama															
Ano	**Média**					**Máximo**					**Mínimo**				
	Obs.	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**
2002	12,09	9,34	-22,72%	12,65	4,61%	98,72	52,23	-47,09%	106,63	8,01%	1,65	2,08	26,18%	1,23	-25,36%
2003	9,03	8,04	-10,89%	10,07	11,56%	154,66	128,40	-16,98%	193,31	24,99%	1,83	2,35	28,63%	0,98	-46,33%
2004	14,33	11,85	-17,29%	17,01	18,73%	157,01	106,70	-32,04%	181,90	15,85%	2,22	2,55	15,00%	1,73	-22,24%
2005	19,60	15,29	-21,98%	20,62	5,23%	225,14	277,40	23,21%	295,82	31,39%	3,27	3,05	-6,70%	2,24	-31,50%
2006	14,56	9,81	-32,63%	12,36	-15,07%	152,92	86,24	-43,60%	138,78	-9,25%	2,28	2,58	12,94%	1,47	-35,51%
2007	14,52	10,58	-27,11%	12,80	-11,85%	106,12	95,24	-10,25%	126,72	19,42%	2,08	2,50	20,00%	0,84	-59,42%
Erro médio	-	-	22,10%	-	11,18%	-	-	28,86%	-	18,15%	-	-	18,24%	-	36,73%

Figura E2 – Comparação das vazões médias, máximas e mínimas observadas e simuladas pelos modelos- Estação fluviométrica 57420000 - Período de calibração

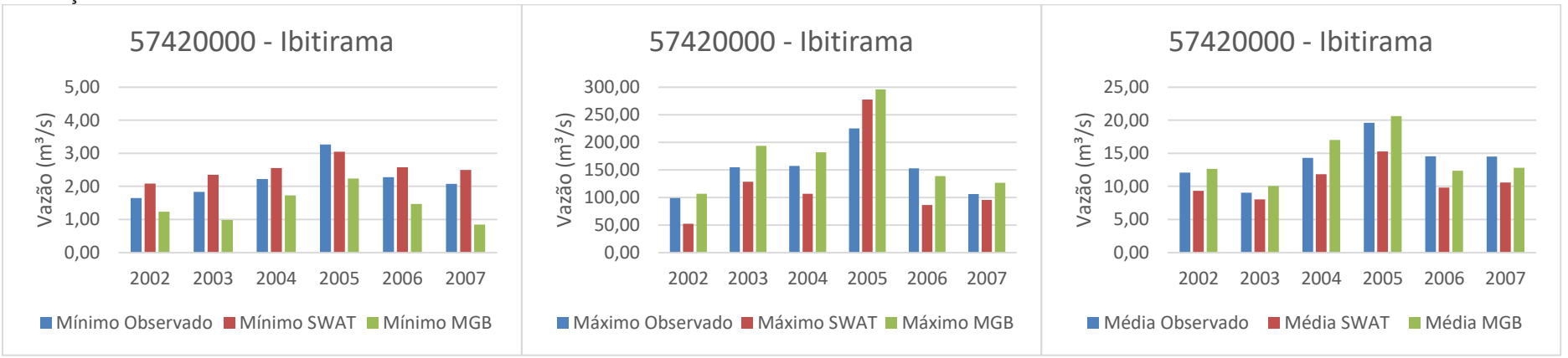


Tabela E3– Média, máximo e mínimo das vazões diárias (m³/s) e erro médio para cada ano do período de calibração na sub-bacia delimitada pelo posto 57450000

57450000 - Rive															
Ano	**Média**					**Máximo**					**Mínimo**				
	Obs.	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**
2002	40,69	39,76	-2,28%	46,60	14,50%	254,82	210,80	-17,27%	334,91	31,43%	8,73	14,89	70,56%	10,35	18,55%
2003	38,58	37,06	-3,95%	38,23	-0,91%	511,91	365,20	-28,66%	573,88	12,10%	9,47	14,91	57,44%	6,45	-31,85%
2004	55,69	53,55	-3,85%	61,93	11,21%	501,21	385,50	-23,09%	474,98	-5,23%	12,68	18,15	43,14%	10,05	-20,75%
2005	71,47	66,61	-6,81%	72,22	1,04%	700,69	646,10	-7,79%	516,59	-26,27%	16,32	22,34	36,89%	14,19	-13,05%
2006	50,51	46,81	-7,31%	46,99	-6,96%	635,26	480,40	-24,38%	549,10	-13,56%	13,55	18,62	37,42%	9,95	-26,55%
2007	52,49	48,03	-8,50%	49,34	-6,02%	394,15	333,90	-15,29%	391,43	-0,69%	12,68	17,75	39,98%	6,84	-46,07%
Erro médio	**-**	**-**	**5,45%**	**-**	**6,77%**	**-**	**-**	**19,41%**	**-**	**14,88%**	**-**	**-**	**47,57%**	**-**	**26,13%**

Figura E3 – Comparação das vazões médias, máximas e mínimas observadas e simuladas pelos modelos- Estação fluviométrica 57450000 - Período de calibração

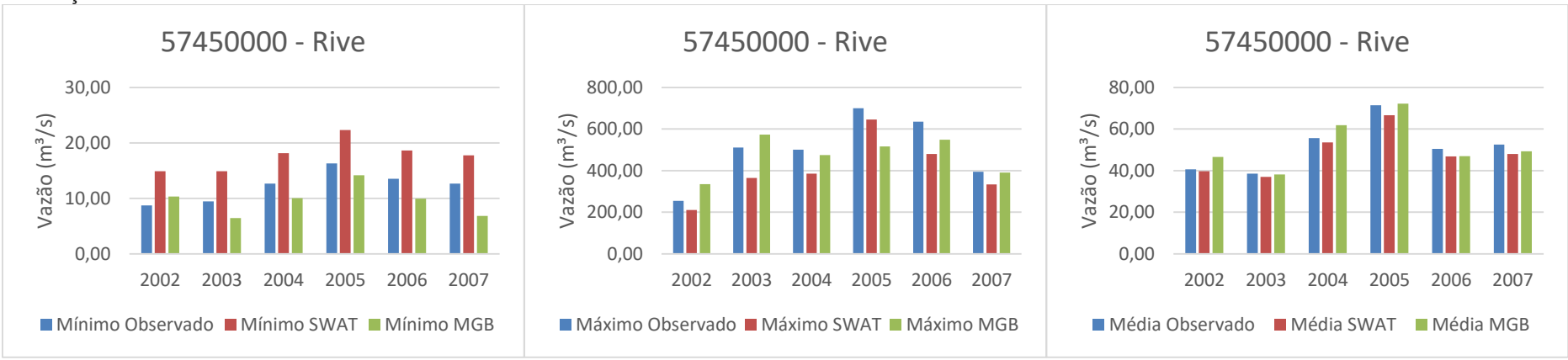


Tabela E4 – Média, máximo e mínimo das vazões diárias (m³/s) e erro médio para cada ano do período de calibração na sub-bacia delimitada pelo posto 57490000

57490000 - Castelo															
Ano	**Média**					**Máximo**					**Mínimo**				
	Obs.	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**
2002	12,31	10,51	-14,62%	15,39	25,06%	142,64	60,37	-57,68%	132,82	-6,89%	2,01	5,58	177,36%	4,24	110,88%
2003	11,20	11,42	1,93%	14,67	30,92%	151,87	106,20	-30,07%	218,05	43,58%	1,44	5,56	285,90%	2,89	100,99%
2004	20,76	15,69	-24,41%	21,72	4,67%	128,10	123,40	-3,67%	135,96	6,14%	3,83	6,49	69,37%	4,23	10,42%
2005	23,86	19,19	-19,55%	25,04	4,94%	169,39	152,20	-10,15%	196,74	16,14%	4,88	7,81	59,94%	6,08	24,52%
2006	19,91	16,00	-19,62%	19,18	-3,67%	136,54	70,35	-48,48%	108,06	-20,86%	5,43	7,52	38,55%	5,33	-1,78%
2007	13,90	12,69	-8,69%	14,21	2,27%	80,82	72,12	-10,76%	104,83	29,71%	2,01	5,79	187,96%	2,86	42,36%
Erro médio	-	-	14,80%	-	11,92 %	-	-	26,80%	-	20,55%	-	-	136,51%	-	48,49%

Figura E4 – Comparação das vazões médias, máximas e mínimas observadas e simuladas pelos modelos- Estação fluviométrica 57490000 - Período de calibração

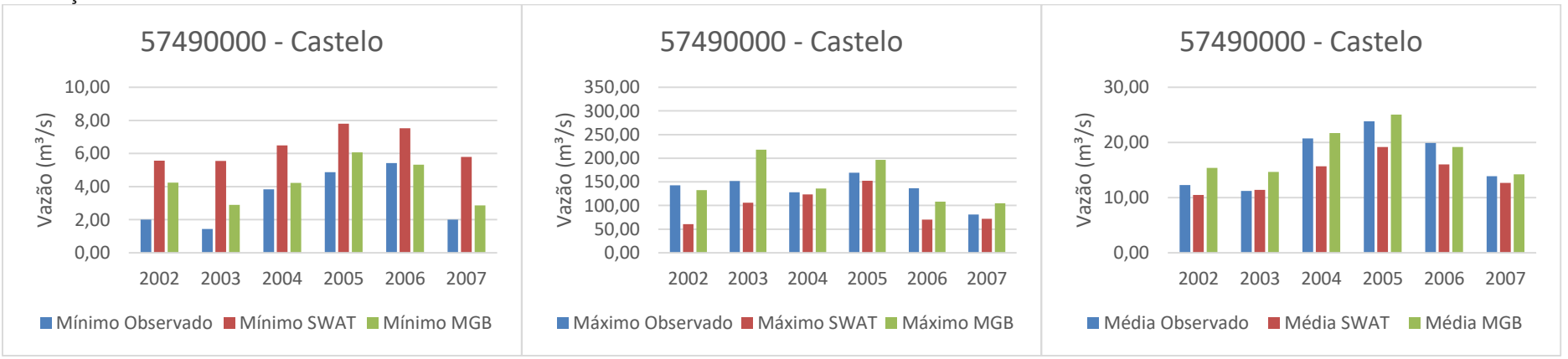
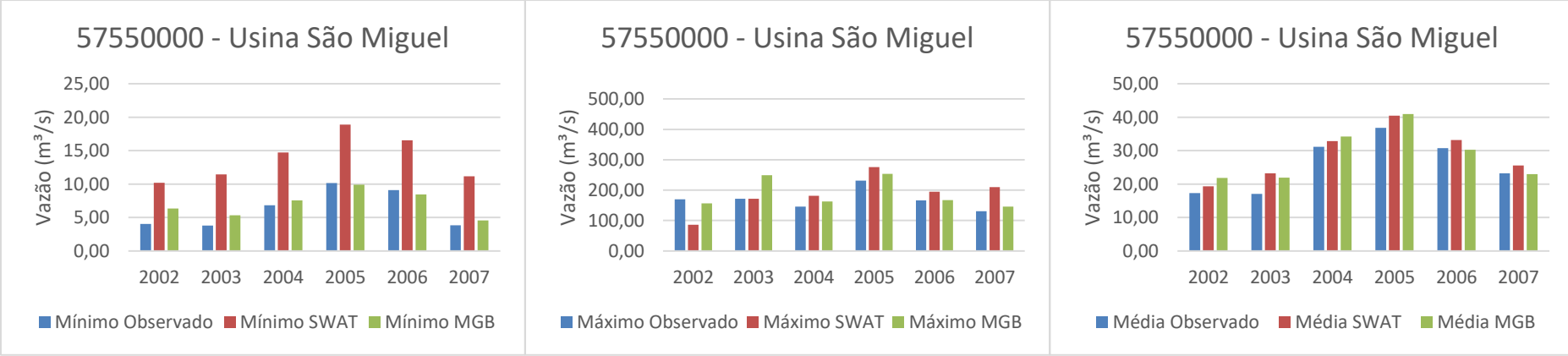


Tabela E5 – Média, máximo e mínimo das vazões diárias (m³/s) e erro médio para cada ano do período de calibração na sub-bacia delimitada pelo posto 57550000

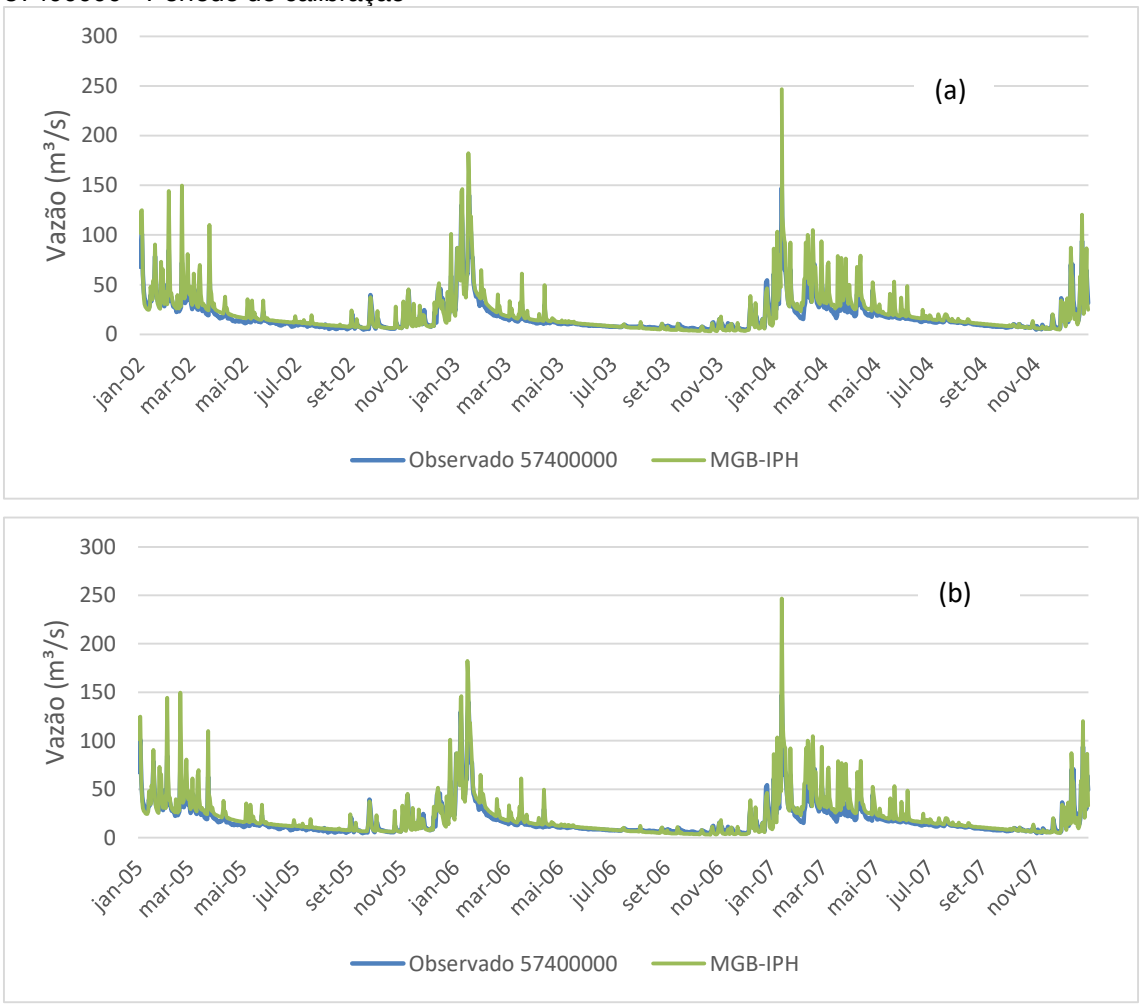
57550000 - Usina São Miguel															
Ano	**Média**					**Máximo**					**Mínimo**				
	Obs.	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**
2002	17,28	19,31	11,73%	21,86	26,46%	169,78	85,79	-49,47%	156,85	-7,62%	4,03	10,20	153,10%	6,35	57,47%
2003	17,05	23,20	36,06%	21,93	28,63%	171,29	171,40	0,06%	249,21	45,49%	3,78	11,44	202,65%	5,35	41,59%
2004	31,15	32,86	5,49%	34,24	9,94%	145,57	181,70	24,82%	163,11	12,05%	6,84	14,72	115,20%	7,55	10,35%
2005	36,81	40,48	9,98%	40,95	11,24%	231,15	276,20	19,49%	253,96	9,87%	10,14	18,90	86,39%	9,92	-2,13%
2006	30,77	33,18	7,83%	30,28	-1,60%	166,02	195,00	17,46%	167,40	0,83%	9,10	16,54	81,76%	8,45	-7,16%
2007	23,19	25,52	10,06%	22,94	-1,06%	130,47	209,70	60,73%	145,93	11,85%	3,84	11,16	190,63%	4,57	19,12%
Erro médio	-	-	13,53%	-	13,15%	-	-	28,67%	-	14,62%	-	-	138,29%	-	22,97%

Figura E5 – Comparação das vazões médias, máximas e mínimas observadas e simuladas pelos modelos- Estação fluviométrica 57550000 - Período de calibração



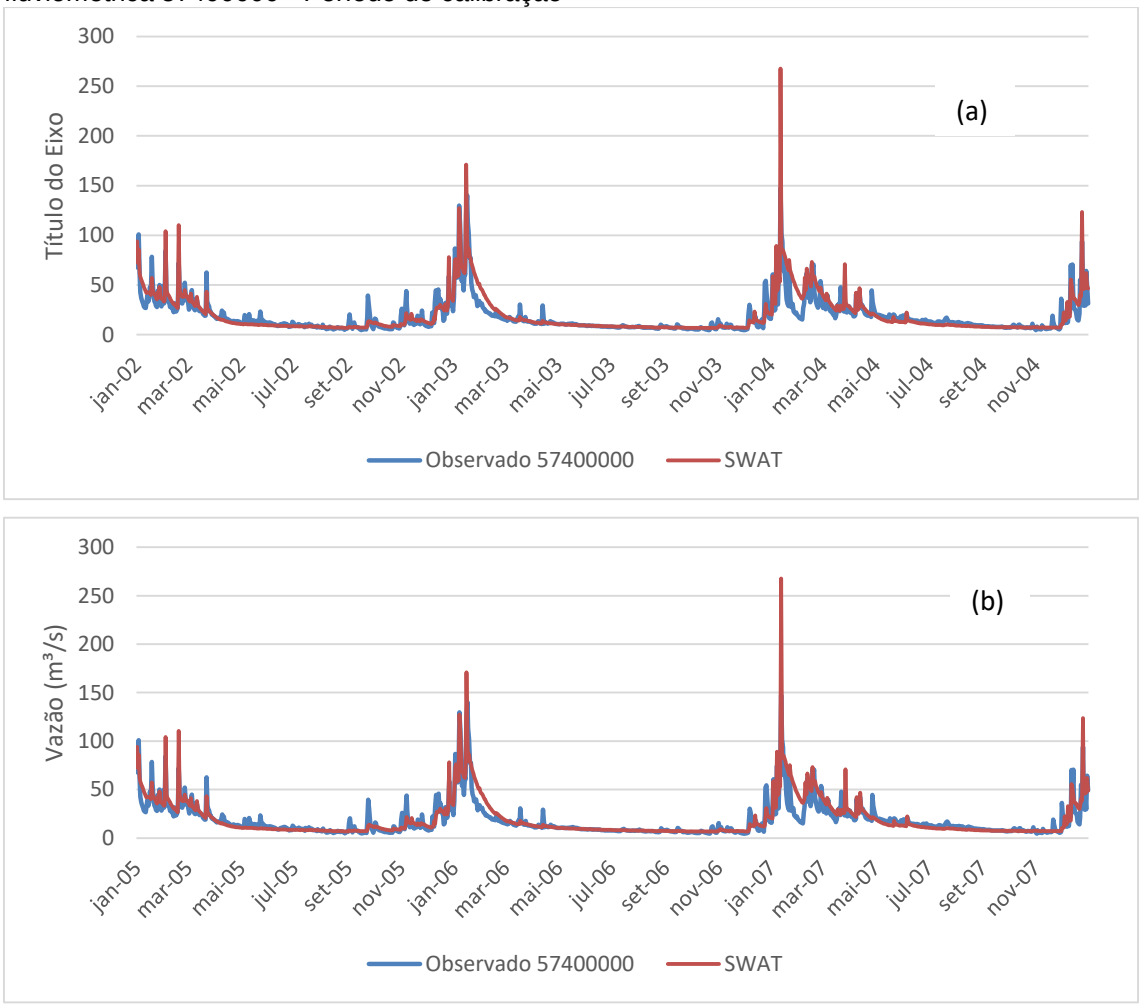
ANEXO F – COMPARAÇÃO ENTRE VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS - PERÍODO DE CALIBRAÇÃO

Figura F1 - Comparação das vazões observadas e simuladas pelo MGB- Estação fluviométrica 57400000 - Período de calibração



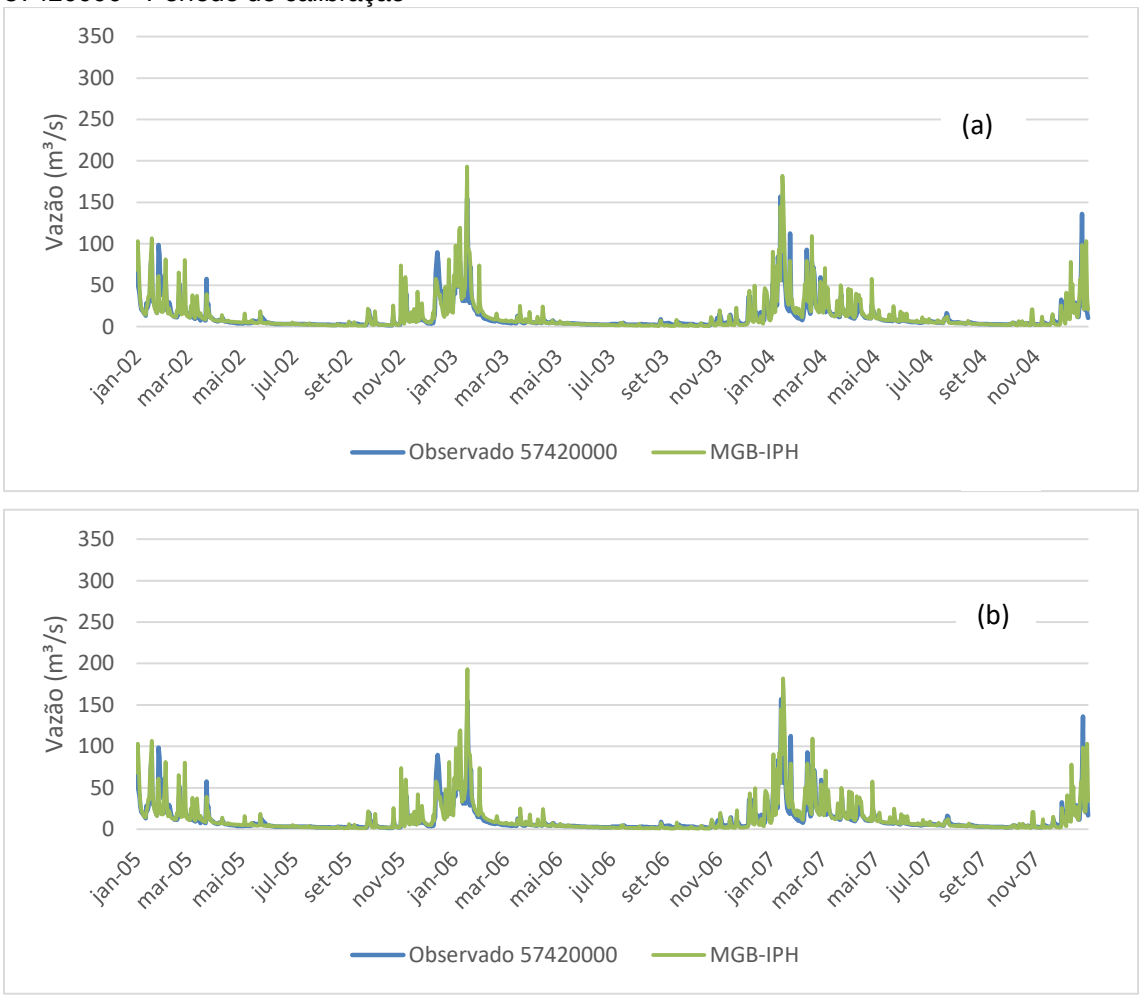
Fonte: o autor.

Figura F2 - Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo SWAT - Estação fluviométrica 57400000 - Período de calibração



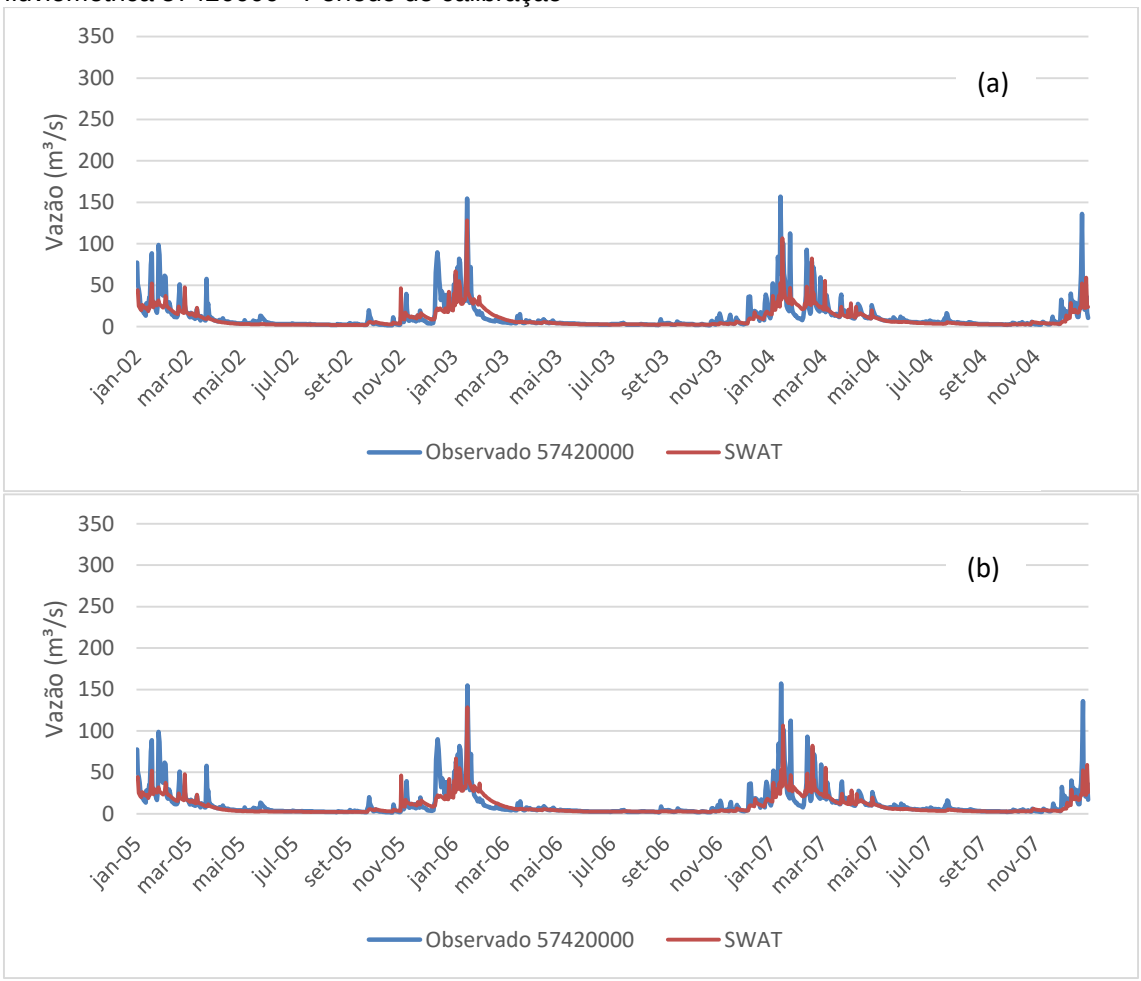
Fonte: o autor.

Figura F3 - Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo MGB - Estação fluviométrica 57420000 - Período de calibração



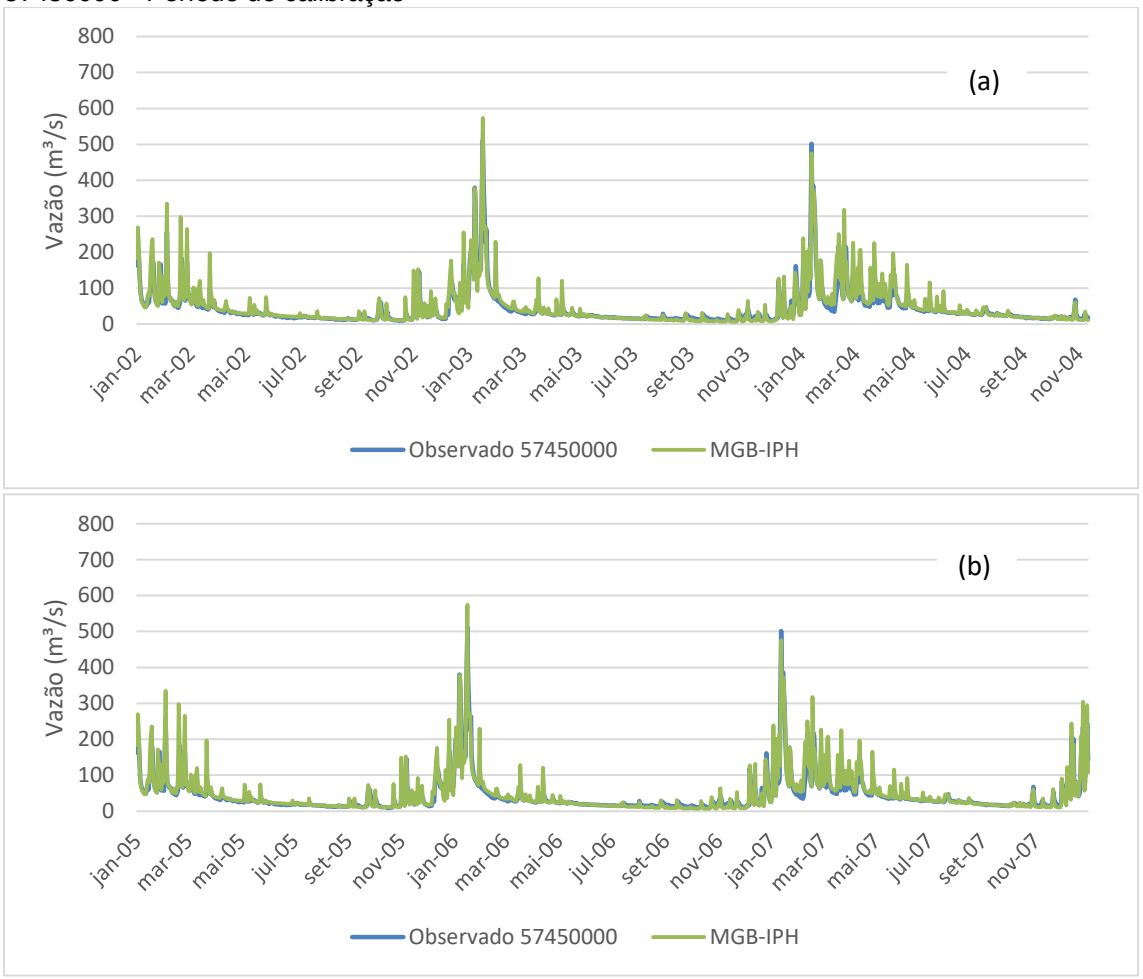
Fonte: o autor.

Figura F4 - Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo SWAT - Estação fluviométrica 57420000 - Período de calibração



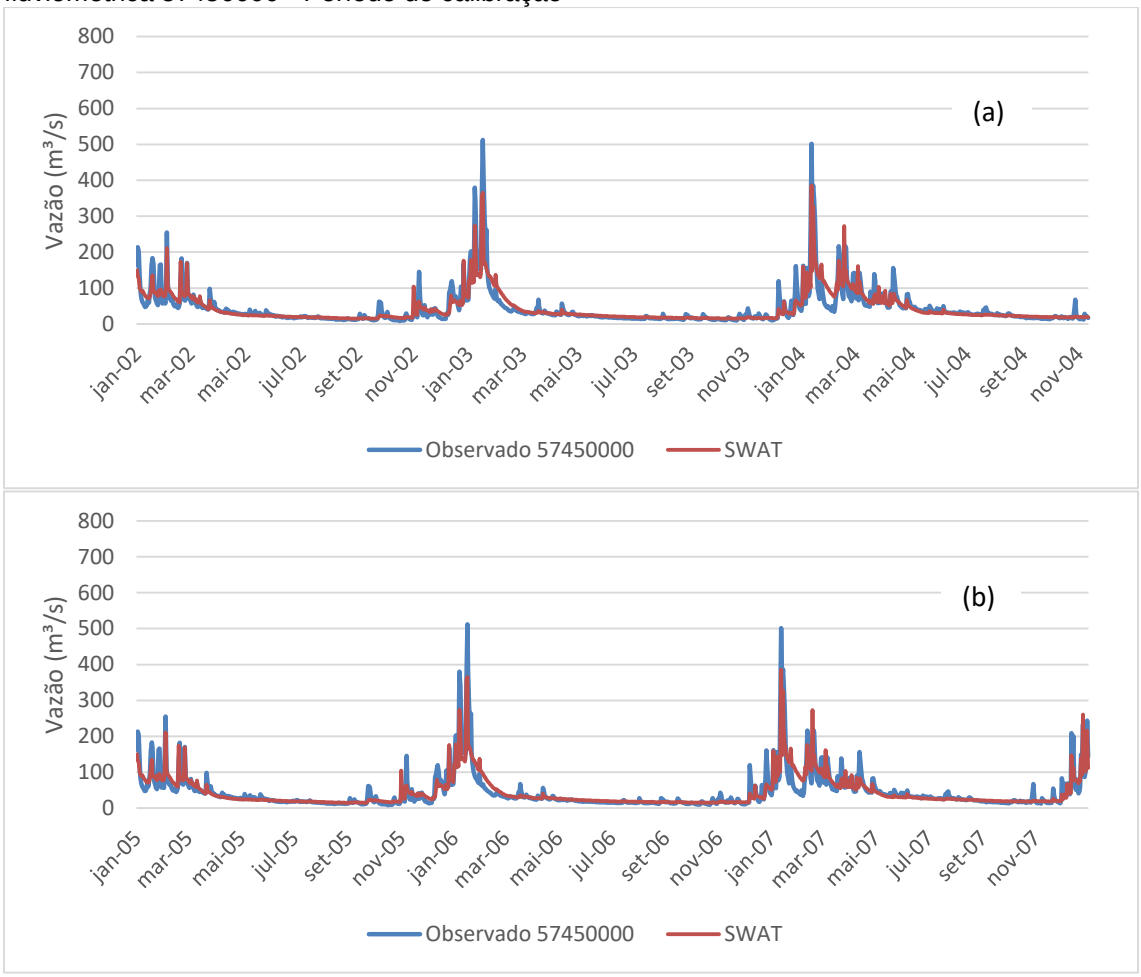
Fonte: o autor.

Figura F5 - Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo MGB - Estação fluviométrica 57450000 - Período de calibração



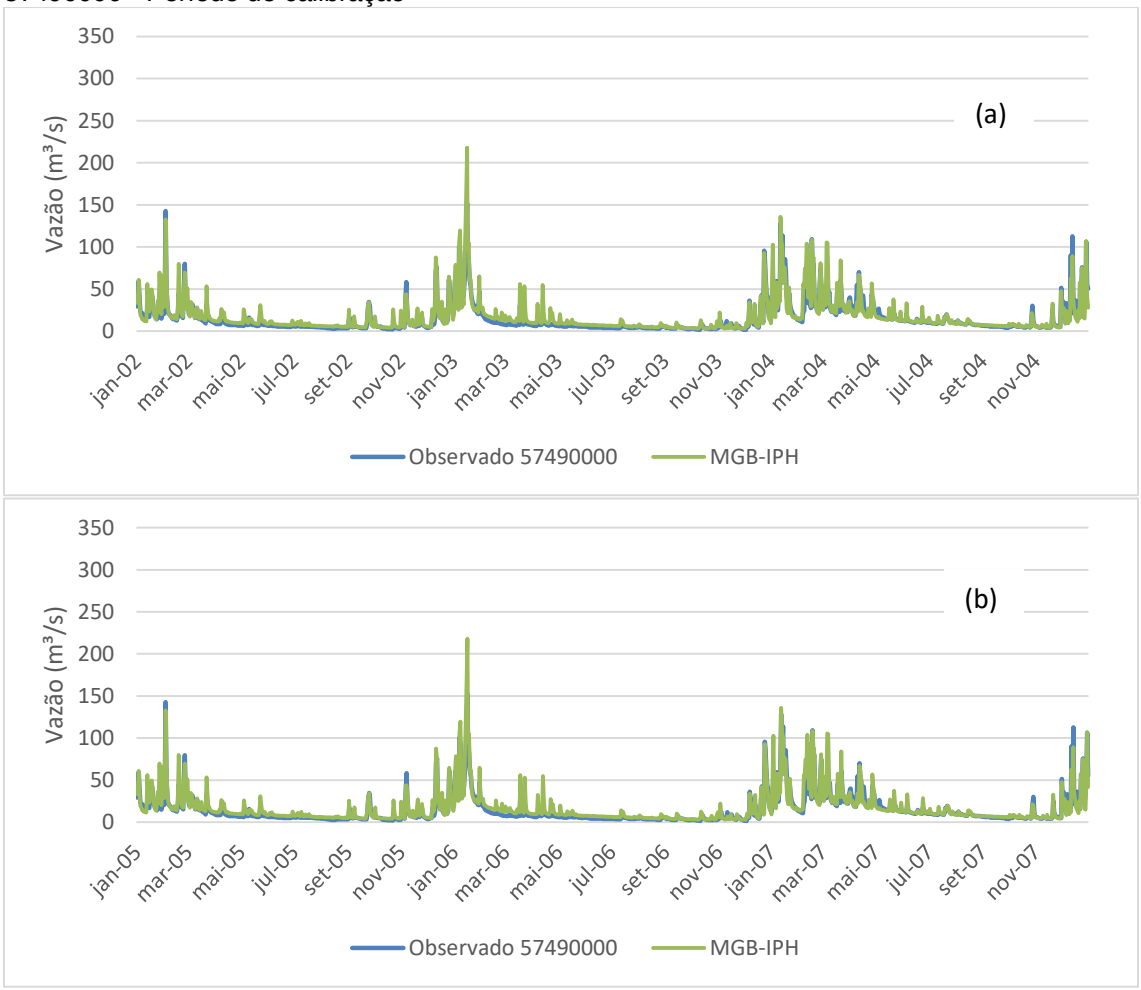
Fonte: o autor.

Figura F6 - Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo SWAT - Estação fluviométrica 57450000 - Período de calibração



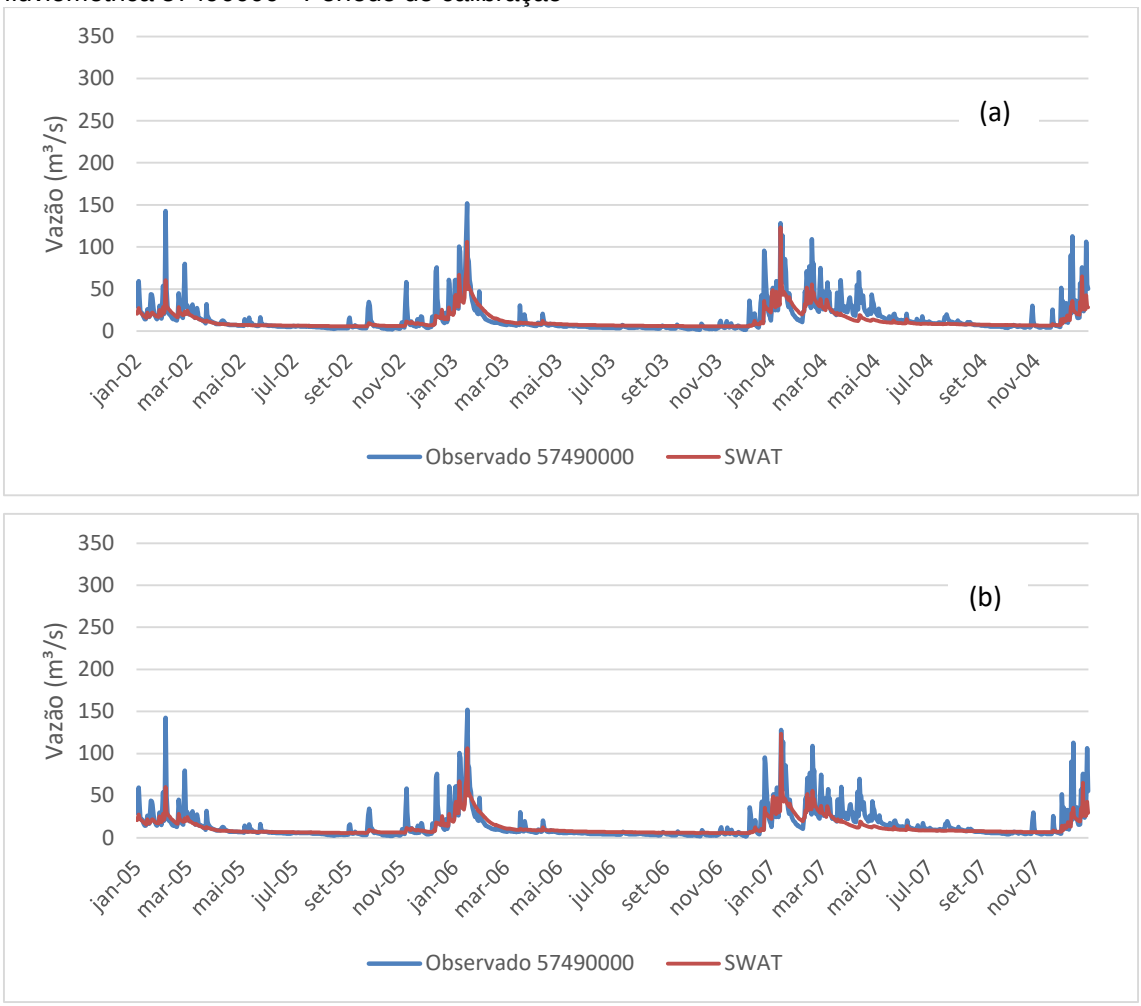
Fonte: o autor.

Figura F7 - Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo - Estação fluviométrica 57490000 - Período de calibração



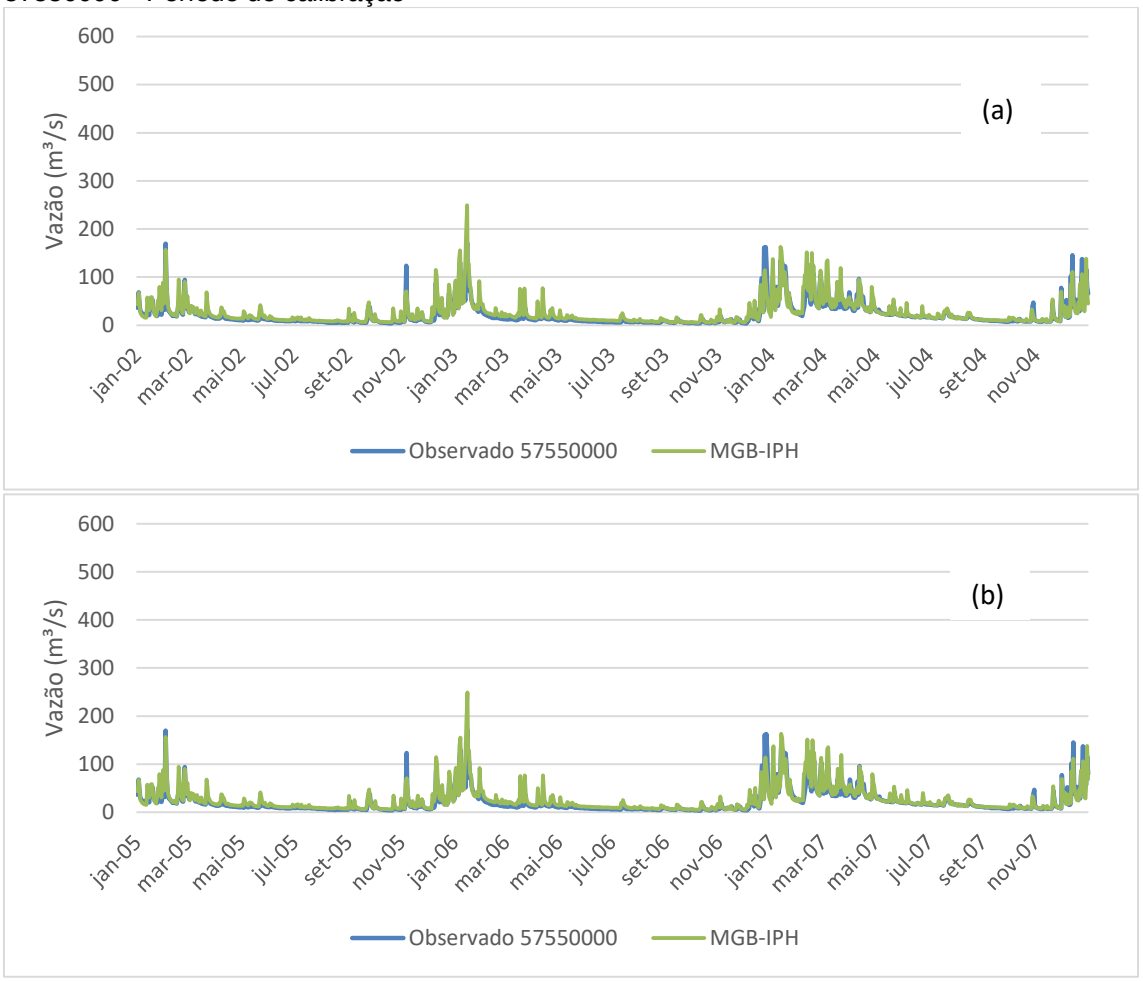
Fonte: o autor.

Figura F8 - Comparação das vazões observadas e simuladas pelo modelo SWAT - Estação fluviométrica 57490000 - Período de calibração



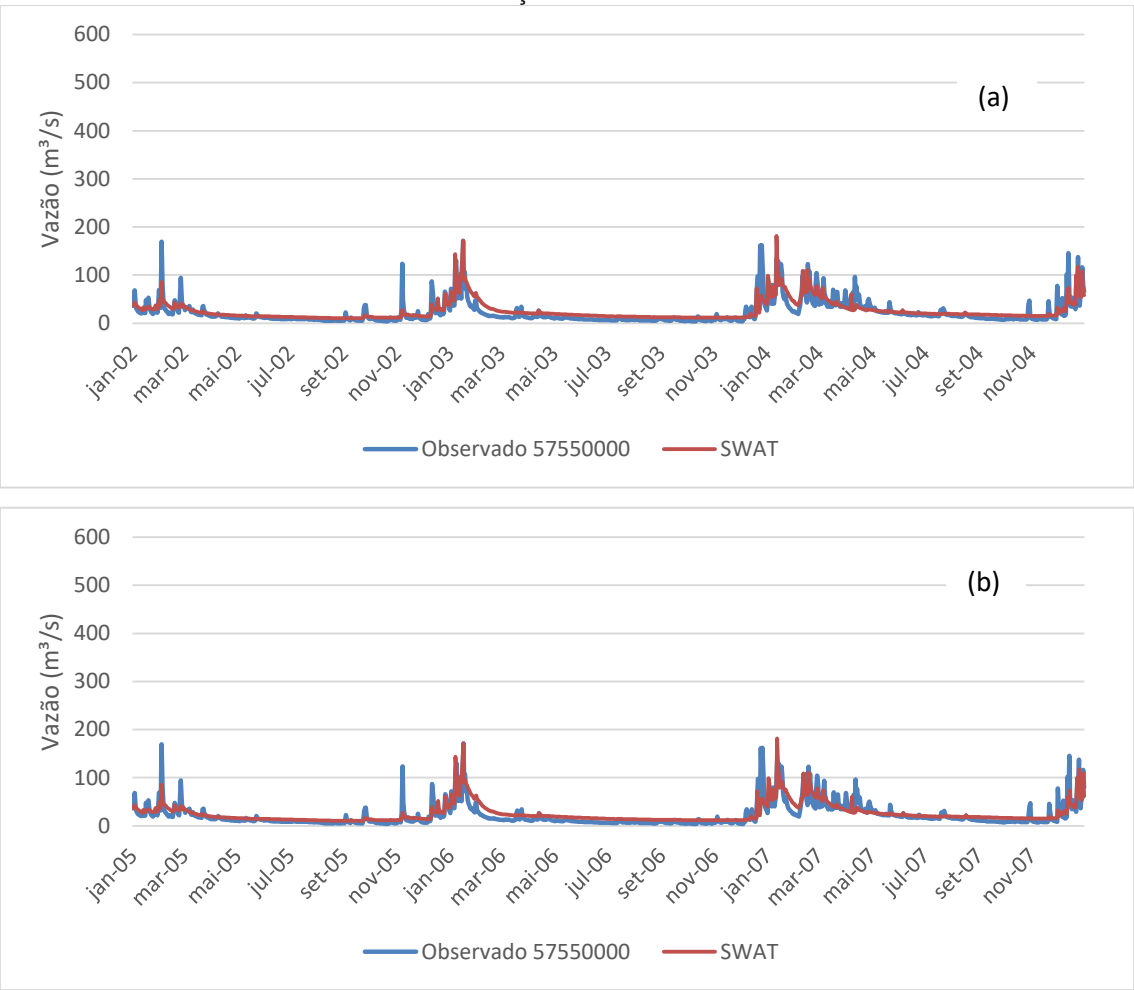
Fonte: o autor.

Figura F9 - Comparação das vazões observadas e simulada pelo modelo MGB - Estação fluviométrica 57550000 - Período de calibração



Fonte: o autor.

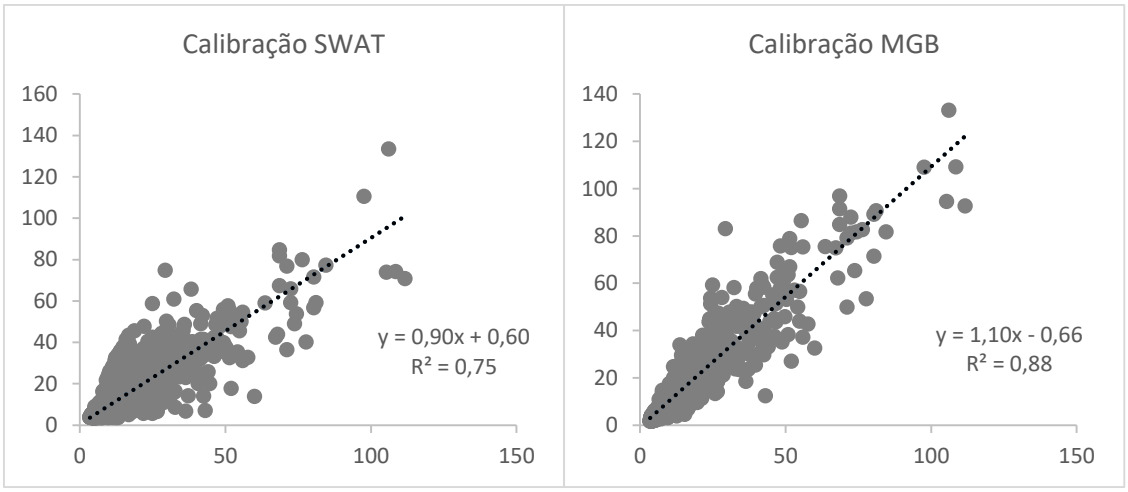
Figura F10 - Comparação das vazões observadas e simulada pelo modelo SWAT - Estação fluviométrica 57550000 - Período de calibração



Fonte: o autor.

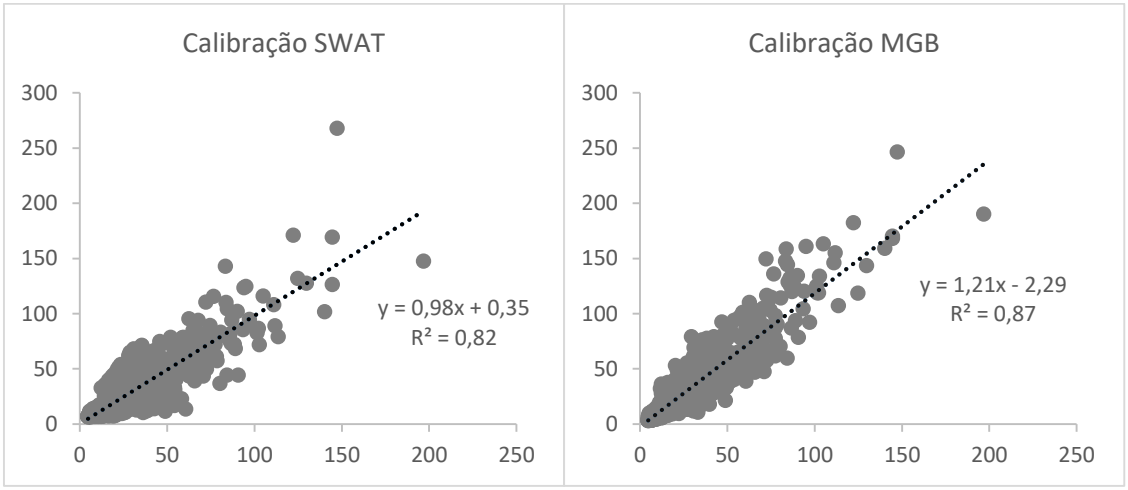
ANEXO G – CORRELAÇÃO ENTRE VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS PELO SWAT E PELO MGB - PERÍODO DE CALIBRAÇÃO

Figura G1 - Correlação entre vazões (m³/s) estimadas e observadas para o período de calibração - Ponto de monitoramento 57370000



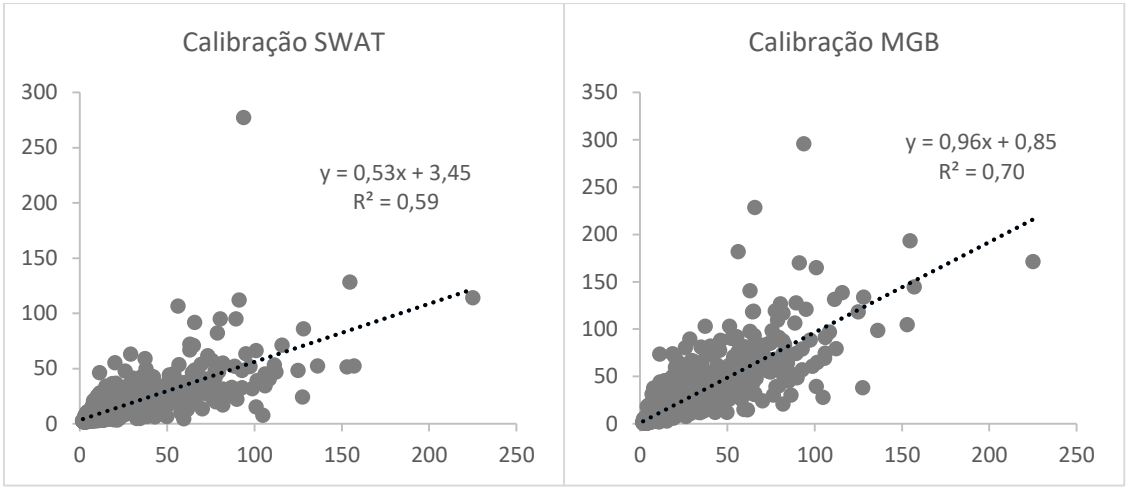
Fonte: o autor.

Figura G2 - Correlação entre vazões (m³/s) estimadas e observadas para o período de calibração - Ponto de monitoramento 57400000



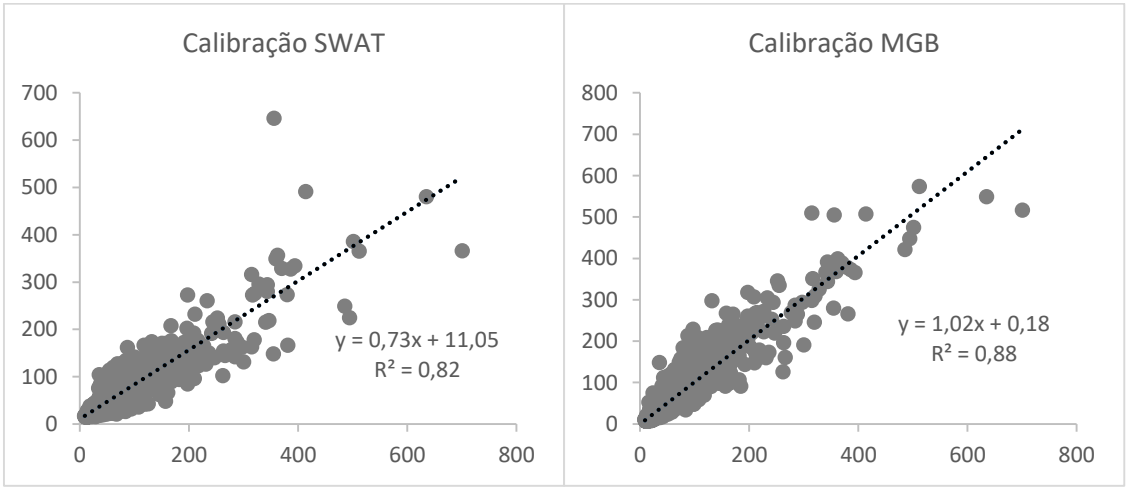
Fonte: o autor.

Figura G3 - Correlação entre vazões (m³/s) estimadas e observadas para o período de calibração - Ponto de monitoramento 57420000



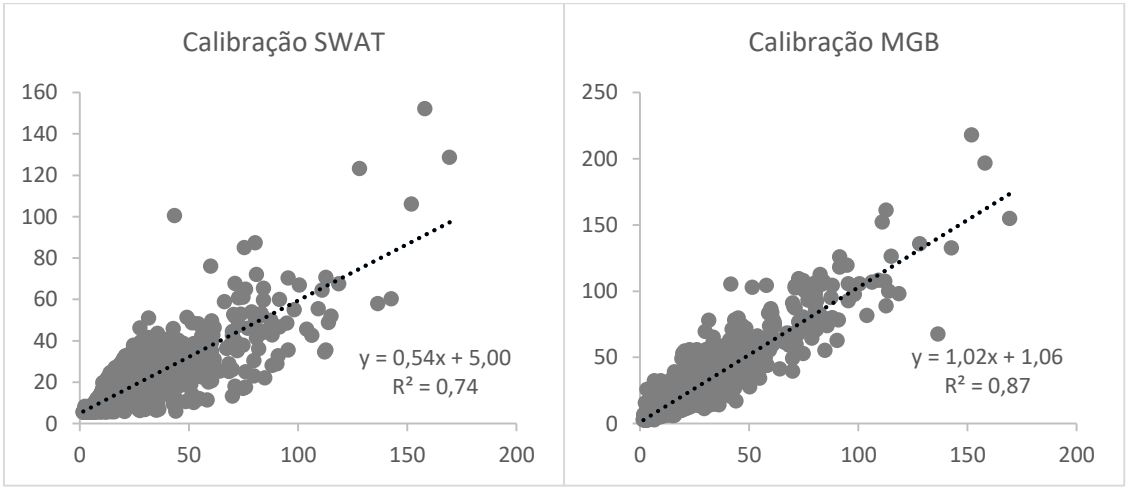
Fonte: o autor.

Figura G4 - Correlação entre vazões (m³/s) estimadas e observadas para o período de calibração - Ponto de monitoramento 57450000



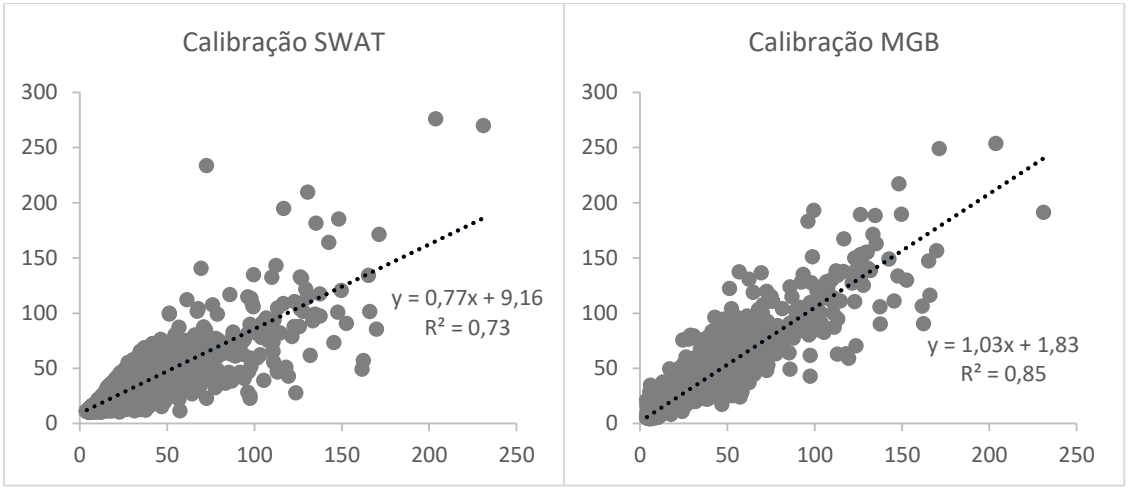
Fonte: o autor.

Figura F5 - Correlação entre vazões (m³/s) estimadas e observadas para o período de calibração - Ponto de monitoramento 57490000



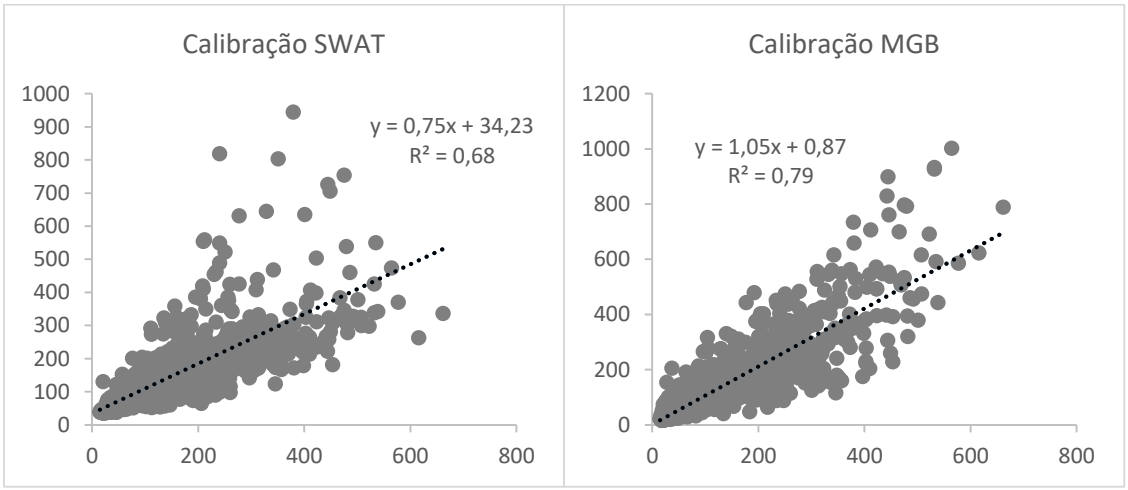
Fonte: o autor.

Figura G6 - Correlação entre vazões (m³/s) estimadas e observadas para o período de calibração - Ponto de monitoramento 57550000



Fonte: o autor.

Figura G7 - Correlação entre vazões (m³/s) estimadas e observadas para o período de calibração - Ponto de monitoramento 57580000



Fonte: o autor.

ANEXO H – VAZÕES MÉDIAS, MÁXIMAS E MÍNIMAS - PERÍODO DE VALIDAÇÃO

Tabela H1– Média, máximo e mínimo das vazões diárias (m³/s) e erro médio para cada ano do período de validação na sub-bacia delimitada pelo posto 57400000

57400000 - Itaici

Ano	Média					Máximo					Mínimo				
	Obs.	SWAT	Erro SWAT	MGB	Erro MGB	Obs.	SWAT	Erro SWAT	MGB	Erro MGB	Obs.	SWAT	Erro SWAT	MGB	Erro MGB
2008	16,14	12,30	-23,76%	17,09	5,89%	123,00	170,20	38,37%	143,04	16,29%	3,77	5,80	53,77%	4,36	15,76%
2009	26,05	24,66	-5,30%	27,99	7,48%	195,40	263,70	34,95%	223,42	14,34%	6,64	8,62	29,76%	7,31	10,05%
2010	17,06	16,15	-5,37%	17,37	1,79%	166,09	153,00	-7,88%	148,11	-10,83%	4,07	6,52	60,15%	4,61	13,35%
2011	24,65	23,44	-4,90%	23,84	-3,30%	172,09	177,20	2,97%	173,34	0,72%	7,15	8,89	24,38%	5,78	-19,12%
2012	15,75	15,71	-0,27%	14,52	-7,85%	101,29	86,10	-15,00%	76,87	-24,11%	4,28	6,70	56,61%	4,64	8,33%
2013	19,35	19,73	2,00%	20,91	8,10%	132,79	158,00	18,98%	136,16	2,54%	4,73	7,59	60,47%	5,76	21,74%
Erro médio	-	-	6,93%	-	5,73%	-	-	19,69%	-	11,47%	-	-	47,52%	-	14,73%

Figura H1 – Comparação das vazões médias, máximas e mínimas observadas e simuladas pelos modelos- Estação fluviométrica 57400000 - Período de validação

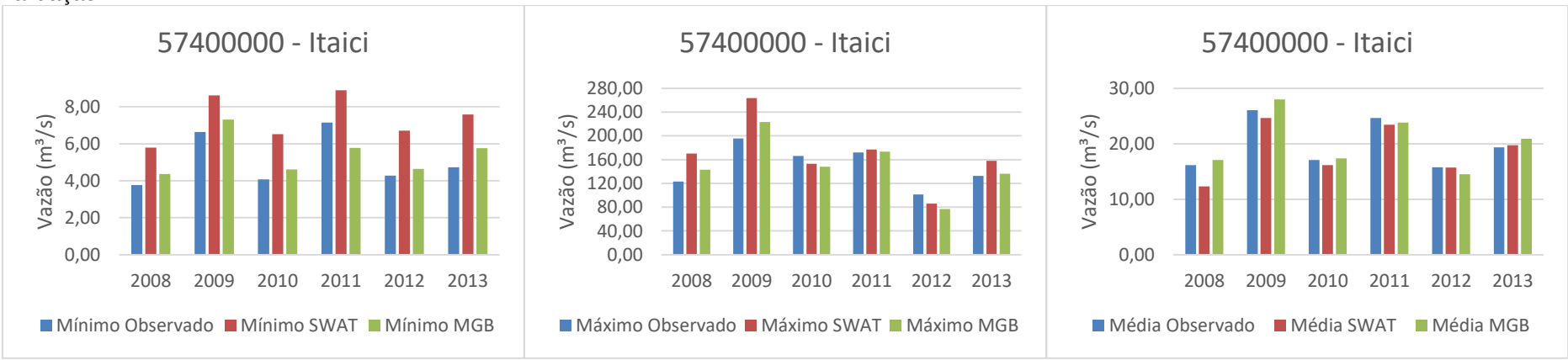


Tabela H2– Média, máximo e mínimo das vazões diárias (m³/s) e erro médio para cada ano do período de validação na sub-bacia delimitada pelo posto 57420000

57420000 - Ibitirama															
Ano	**Média**					**Máximo**					**Mínimo**				
	Obs.	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**
2008	14,33	8,40	-41,37%	13,00	-9,33%	184,79	68,70	-62,82%	152,03	-17,73%	1,77	2,59	46,38%	1,49	-16,07%
2009	16,83	13,05	-22,44%	16,17	-3,95%	169,66	121,20	-28,56%	199,76	17,74%	3,35	4,44	32,45%	2,31	-31,10%
2010	11,44	9,21	-19,43%	12,03	5,21%	158,78	112,40	-29,21%	152,95	-3,67%	2,15	2,73	26,98%	1,27	-41,03%
2011	15,97	11,09	-30,56%	14,70	-7,97%	96,02	66,06	-31,20%	133,60	39,13%	2,28	3,64	59,65%	1,12	-50,94%
2012	10,79	8,23	-23,68%	7,74	-28,23%	211,66	58,73	-72,25%	117,71	-44,39%	1,77	2,91	64,35%	1,38	-22,23%
2013	13,01	8,38	-35,55%	12,94	-0,50%	189,35	96,85	-48,85%	175,37	-7,38%	1,65	2,64	59,94%	1,35	-17,93%
Erro médio	-	-	28,84%	-	9,20%	-	-	45,48%	-	21,67%	-	-	48,29%	-	29,88%

Figura H2 – Comparação das vazões médias, máximas e mínimas observadas e simuladas pelos modelos- Estação fluviométrica 57420000 - Período de validação

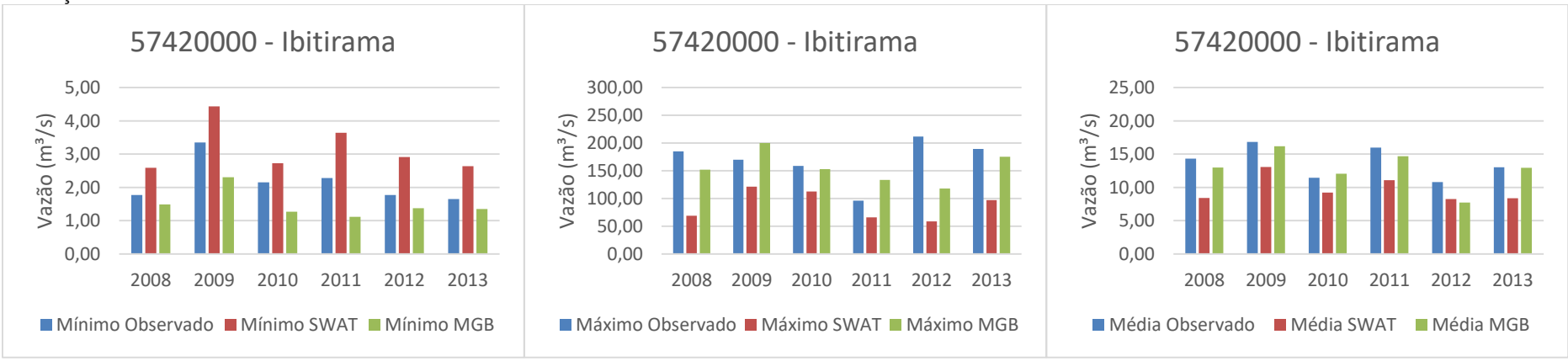


Tabela H3 – Média, máximo e mínimo das vazões diárias (m³/s) e erro médio para cada ano do período de validação na sub-bacia delimitada pelo posto 57450000

57450000 - Rive															
Ano	**Média**					**Máximo**					**Mínimo**				
	Obs.	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**
2008	46,54	36,20	-22,23%	45,90	-1,38%	564,85	327,90	-41,95%	428,18	-24,20%	10,62	16,15	52,07%	8,87	-16,44%
2009	70,57	63,12	-10,55%	67,03	-5,02%	753,95	427,90	-43,25%	625,77	-17,00%	18,28	25,19	37,80%	14,65	-19,85%
2010	38,86	41,01	5,53%	42,92	10,44%	645,02	491,80	-23,75%	545,37	-15,45%	9,47	17,45	84,27%	8,86	-6,41%
2011	59,23	56,23	-5,07%	57,57	-2,80%	583,57	401,20	-31,25%	494,42	-15,28%	10,23	23,61	130,79%	10,30	0,71%
2012	40,31	40,87	1,39%	33,38	-17,20%	531,76	202,60	-61,90%	266,51	-49,88%	11,02	18,53	68,15%	8,34	-24,36%
2013	46,32	48,50	4,71%	49,40	6,66%	425,40	570,40	34,09%	431,94	1,54%	10,62	19,78	86,25%	10,21	-3,83%
Erro médio	-	-	8,25%	-	7,25%	-	-	39,36%	-	20,56%	-	-	76,56%	-	11,93%

Figura H3 – Comparação das vazões médias, máximas e mínimas observadas e simuladas pelos modelos- Estação fluviométrica 57450000 - Período de validação

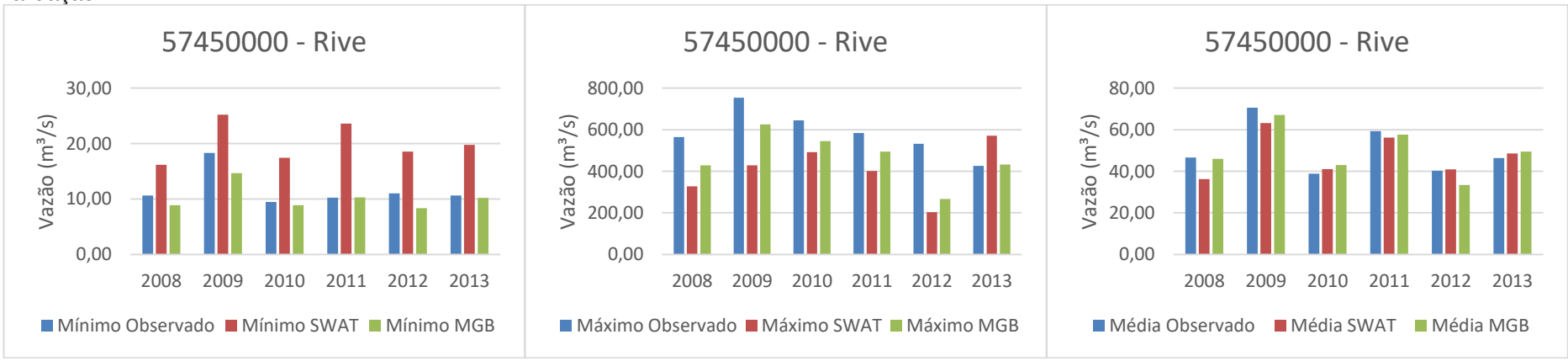


Tabela H4– Média, máximo e mínimo das vazões diárias (m³/s) e erro médio para cada ano do período de validação na sub-bacia delimitada pelo posto 57490000

57490000 - Castelo															
Ano	**Média**					**Máximo**					**Mínimo**				
	Obs.	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**
2008	18,11	11,72	-35,29%	19,44	7,38%	139,59	98,46	-29,46%	121,23	-13,15%	2,01	6,00	198,51%	4,20	109,12%
2009	26,73	23,84	-10,80%	29,04	8,65%	269,94	307,60	13,95%	321,57	19,13%	4,45	8,86	99,12%	6,02	35,32%
2010	11,27	12,84	13,89%	14,43	28,00%	119,16	97,64	-18,06%	154,20	29,41%	1,94	5,81	199,38%	3,93	102,66%
2011	18,82	14,09	-25,11%	17,91	-4,80%	145,70	115,40	-20,80%	129,31	-11,25%	1,55	6,80	338,52%	4,15	167,52%
2012	11,84	13,22	11,65%	14,06	18,69%	92,53	104,50	12,94%	99,82	7,88%	2,87	6,23	117,21%	4,08	42,14%
2013	18,22	19,44	6,70%	24,22	32,94%	177,00	109,90	-37,91%	192,69	8,86%	3,62	7,35	102,96%	4,96	37,05%
Erro médio	-	-	17,24%	-	16,74%	-	-	22,19%	-	14,95%	-	-	175,95%	-	82,30%

Figura H4 – Comparação das vazões médias, máximas e mínimas observadas e simuladas pelos modelos- Estação fluviométrica 57490000 - Período de validação

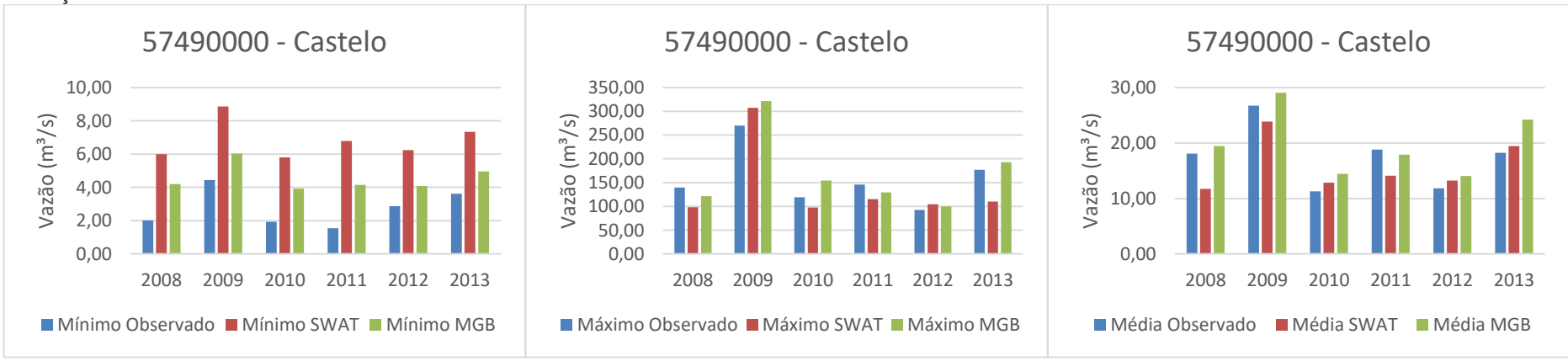
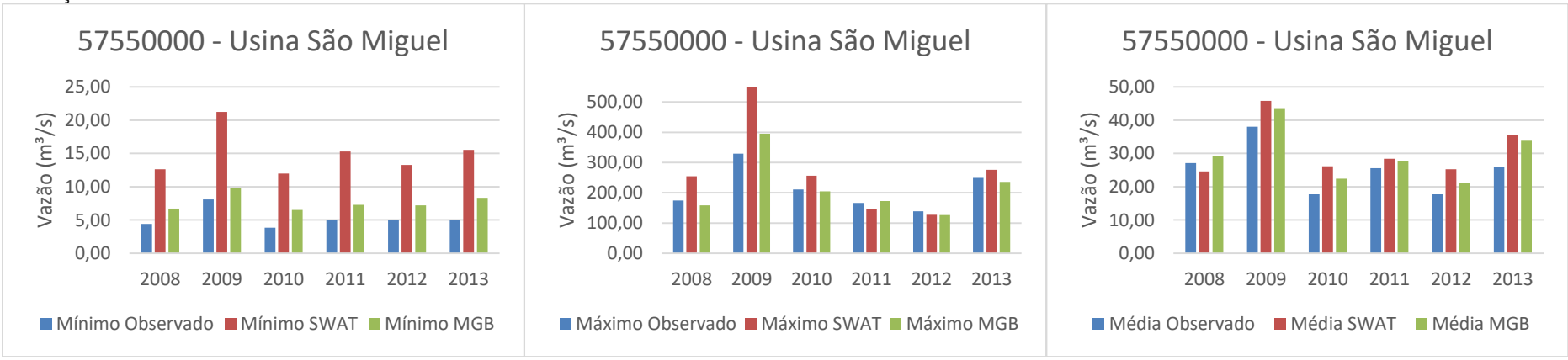


Tabela H5– Média, máximo e mínimo das vazões diárias (m³/s) e erro médio para cada ano do período de validação na sub-bacia delimitada pelo posto 57550000

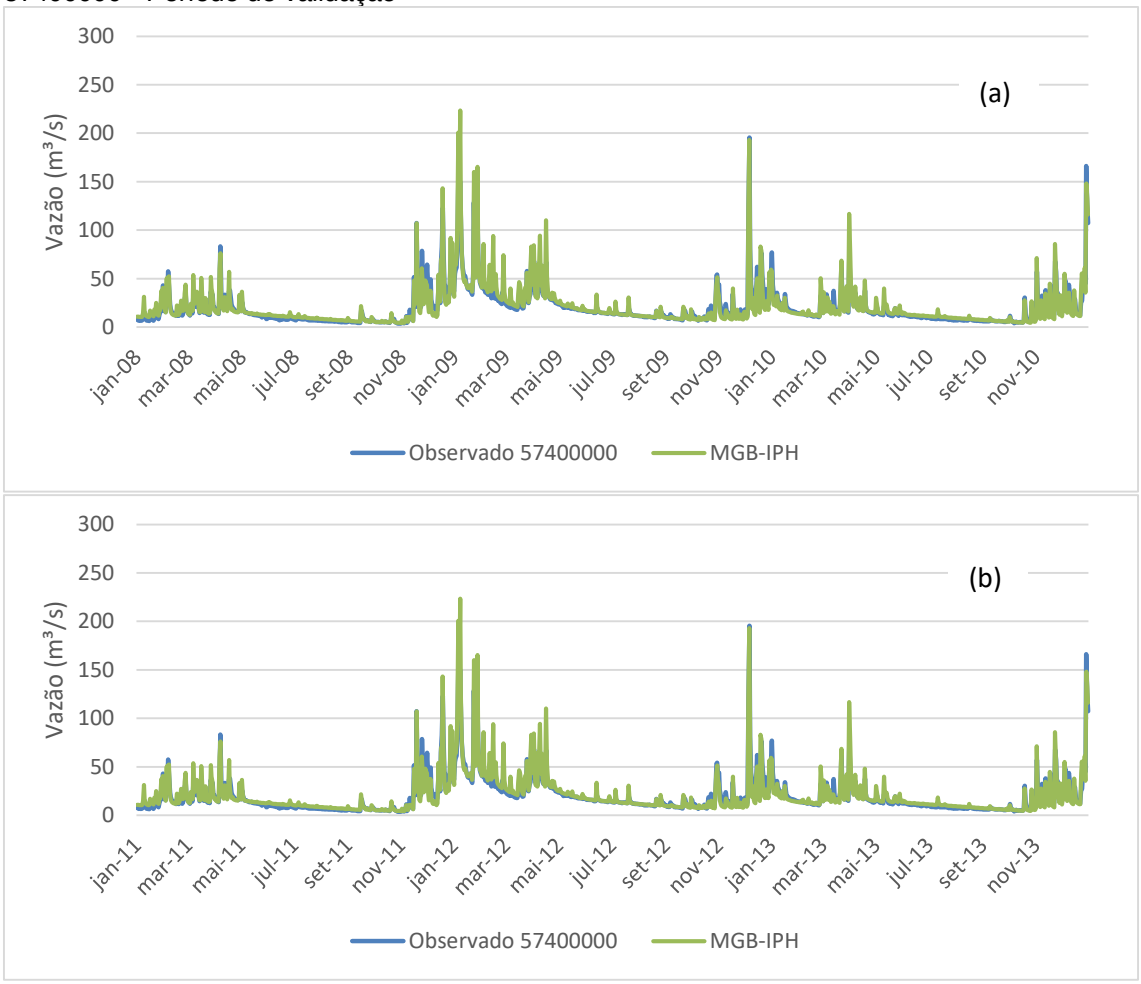
57550000 - Usina São Miguel															
Ano	**Média**					**Máximo**					**Mínimo**				
	Obs.	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**	**Obs.**	**SWAT**	**Erro SWAT**	**MGB**	**Erro MGB**
2008	27,12	24,64	-9,15%	29,12	7,38%	174,31	254,50	46,00%	158,75	-8,93%	4,40	12,63	187,05%	6,73	52,97%
2009	38,03	45,83	20,53%	43,64	14,77%	329,33	549,40	66,82%	395,65	20,14%	8,09	21,25	162,67%	9,76	20,65%
2010	17,72	26,11	47,33%	22,42	26,54%	210,93	256,10	21,41%	205,14	-2,75%	3,84	11,99	212,24%	6,51	69,48%
2011	25,58	28,40	11,02%	27,62	7,94%	166,77	146,90	-11,91%	172,27	3,30%	4,97	15,30	207,85%	7,29	46,71%
2012	17,76	25,24	42,09%	21,21	19,41%	138,91	127,60	-8,14%	126,72	-8,77%	5,04	13,28	163,49%	7,19	42,62%
2013	25,94	35,46	36,71%	33,85	30,49%	249,36	276,00	10,68%	235,51	-5,56%	5,04	15,53	208,13%	8,33	65,33%
Erro médio	-	-	27,80%	-	17,76%	-	-	27,50%	-	8,24%	-	-	190,24%	-	49,63%

Figura H5 – Comparação das vazões médias, máximas e mínimas observadas e simuladas pelos modelos- Estação fluviométrica 57550000 - Período de validação



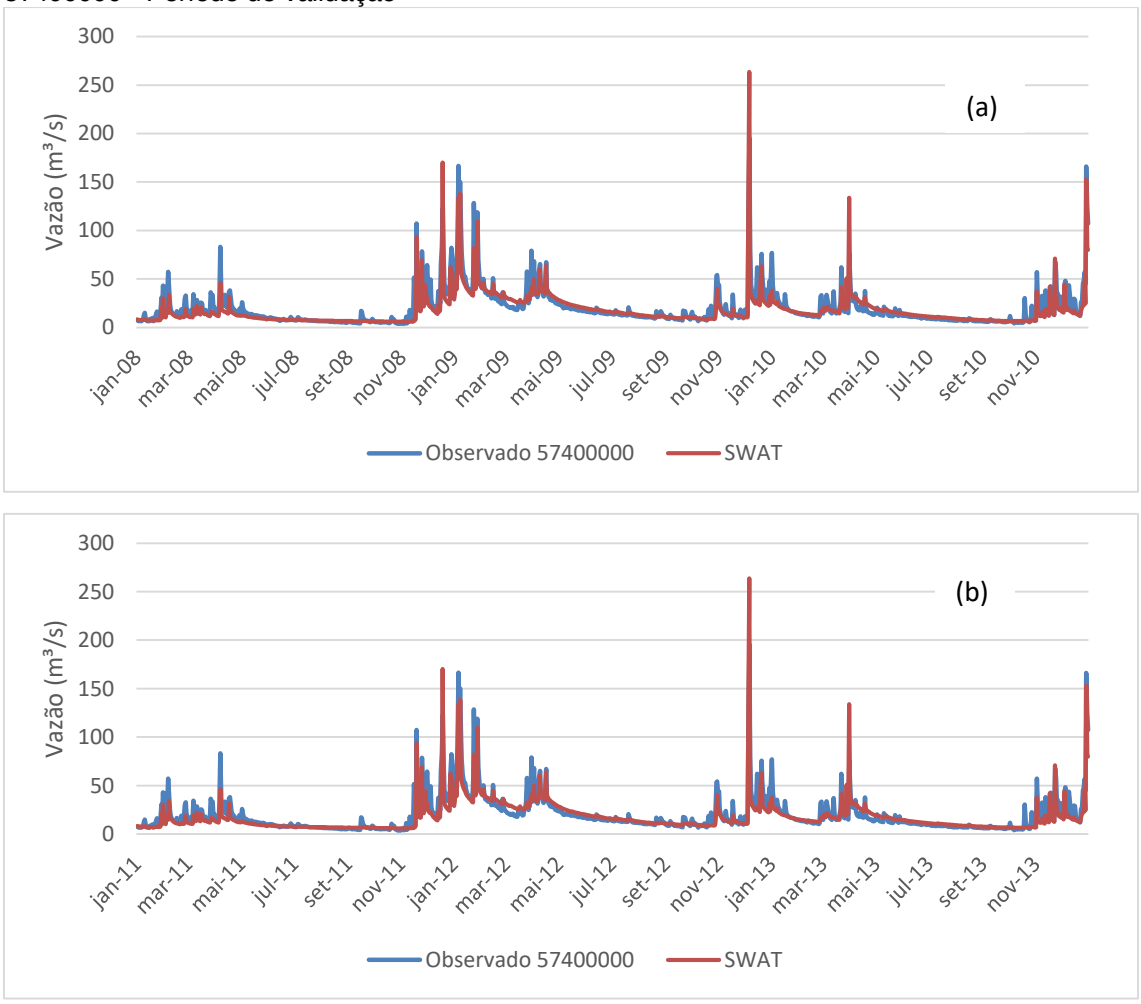
ANEXO I – COMPARAÇÃO ENTRE VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS - PERÍODO DE VALIDAÇÃO

Figura I1 - Comparação das vazões observada e simuladas pelo modelo MGB - Estação fluviométrica 57400000 - Período de validação



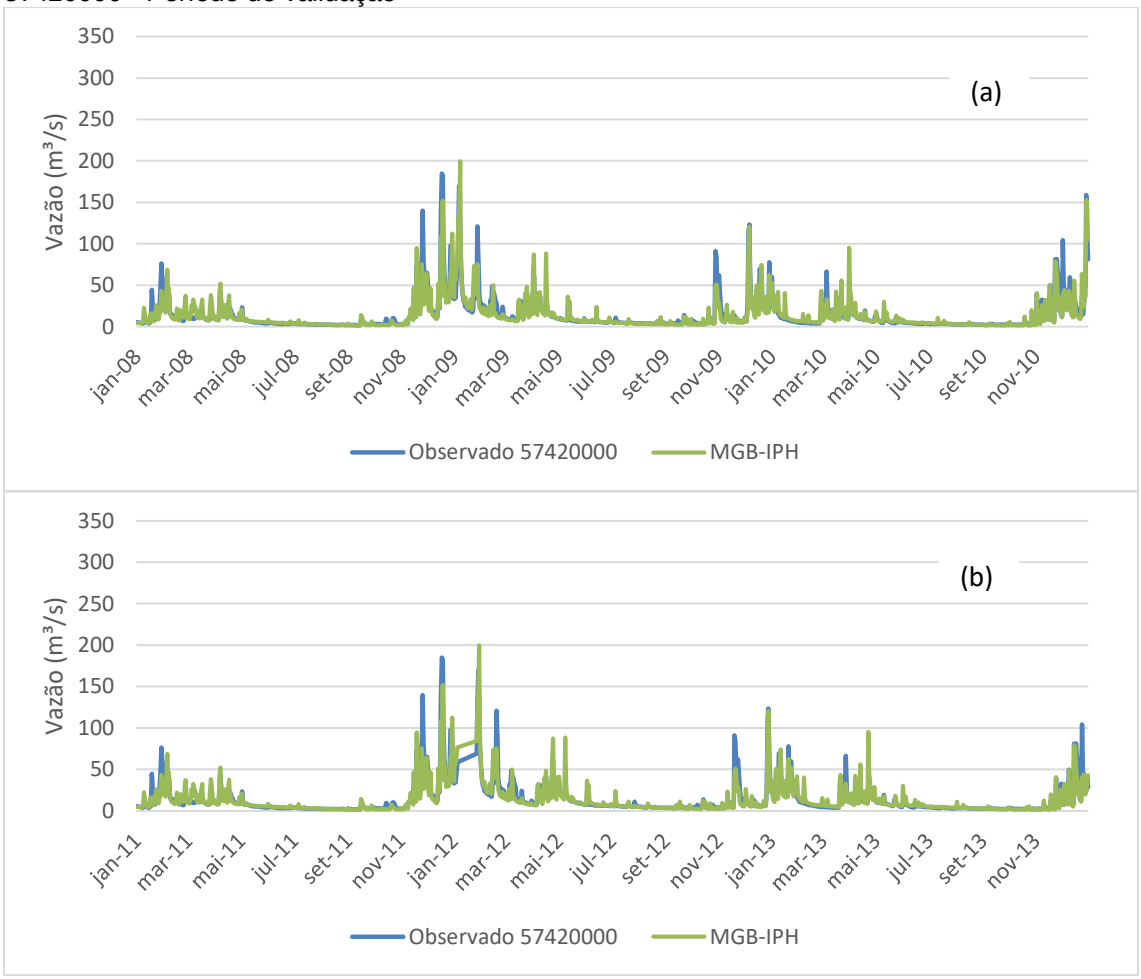
Fonte: o autor.

Figura I2 - Comparação das vazões observada e simuladas pelo modelo SWAT - Estação fluviométrica 57400000 - Período de validação



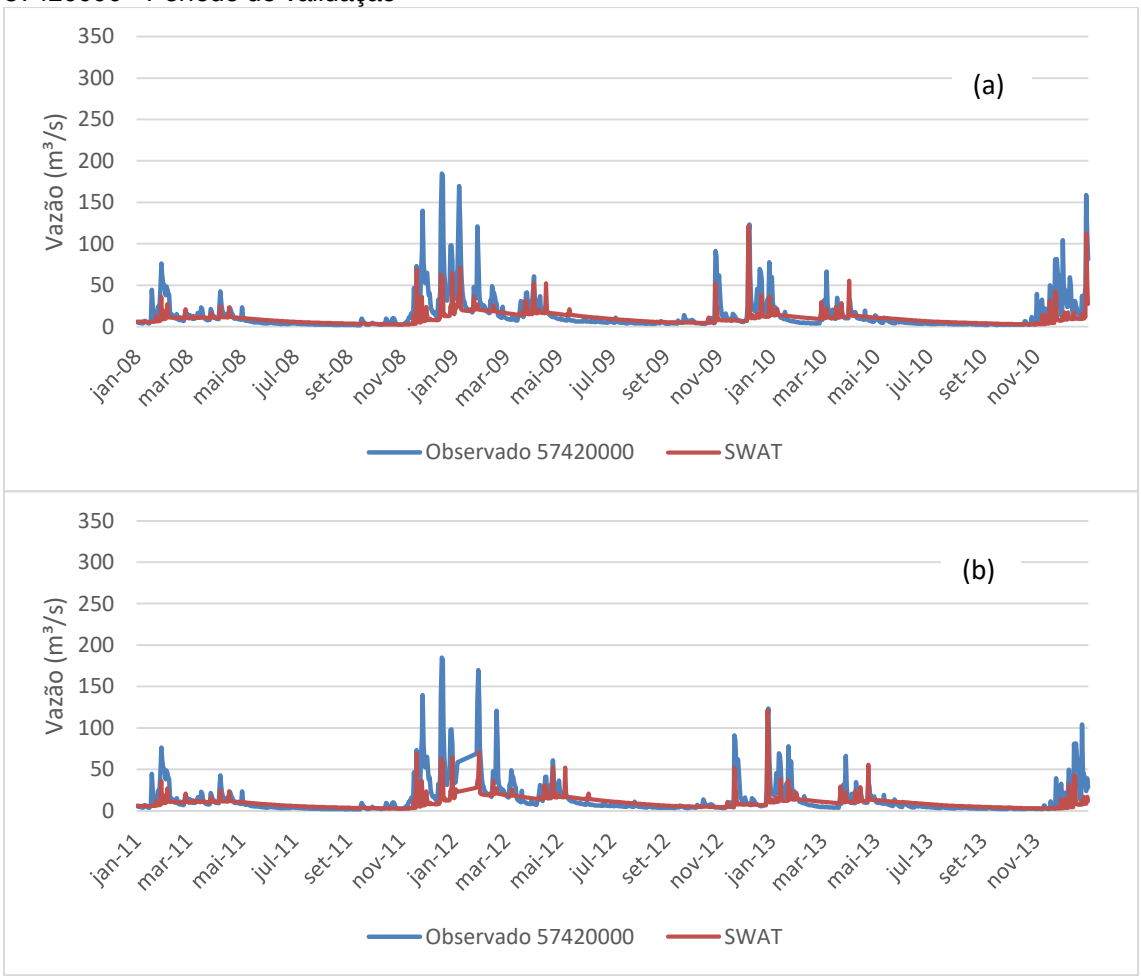
Fonte: o autor.

Figura I3 - Comparação das vazões observada e simuladas pelo modelo MGB - Estação fluviométrica 57420000 - Período de validação



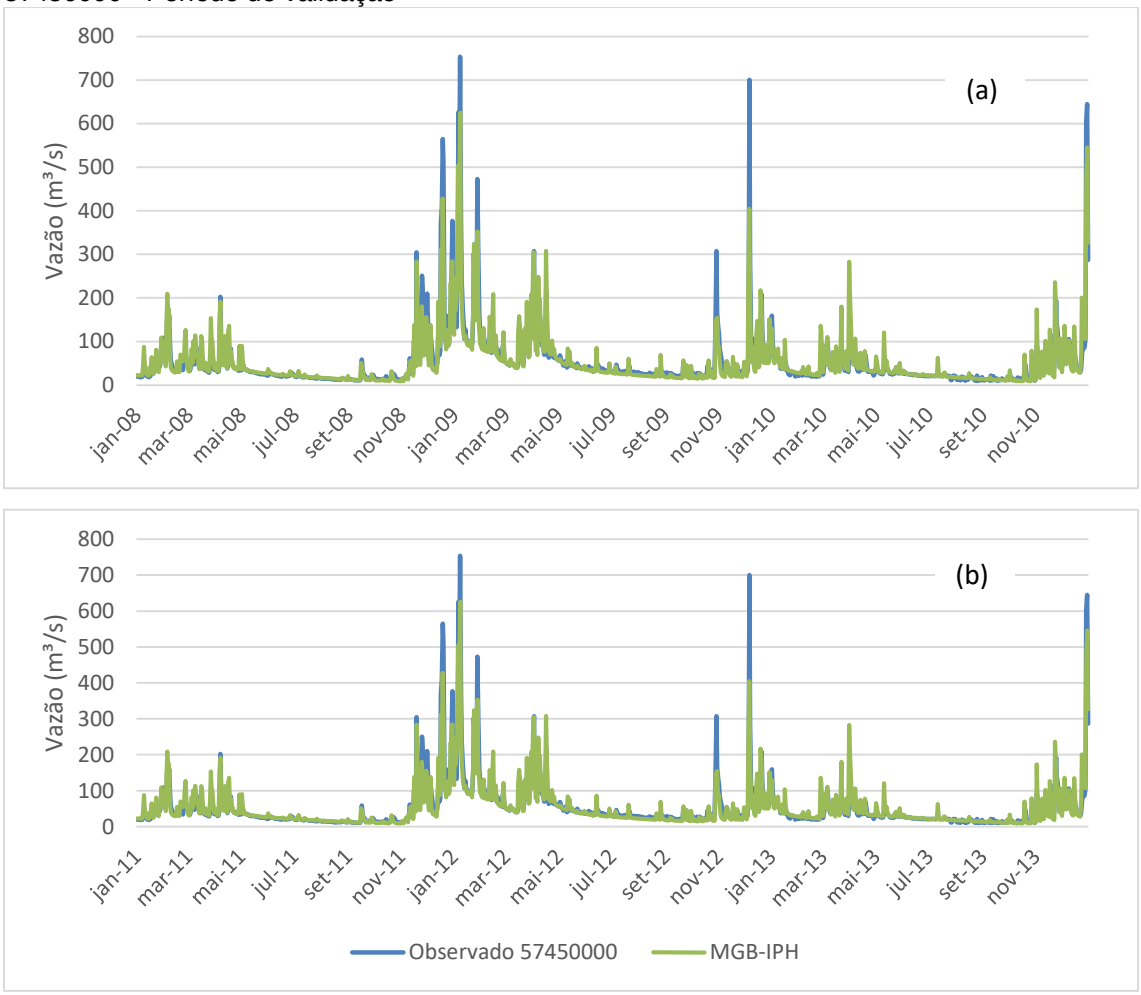
Fonte: o autor.

Figura I4 - Comparação das vazões observada e simuladas pelo modelo SWAT - Estação fluviométrica 57420000 - Período de validação



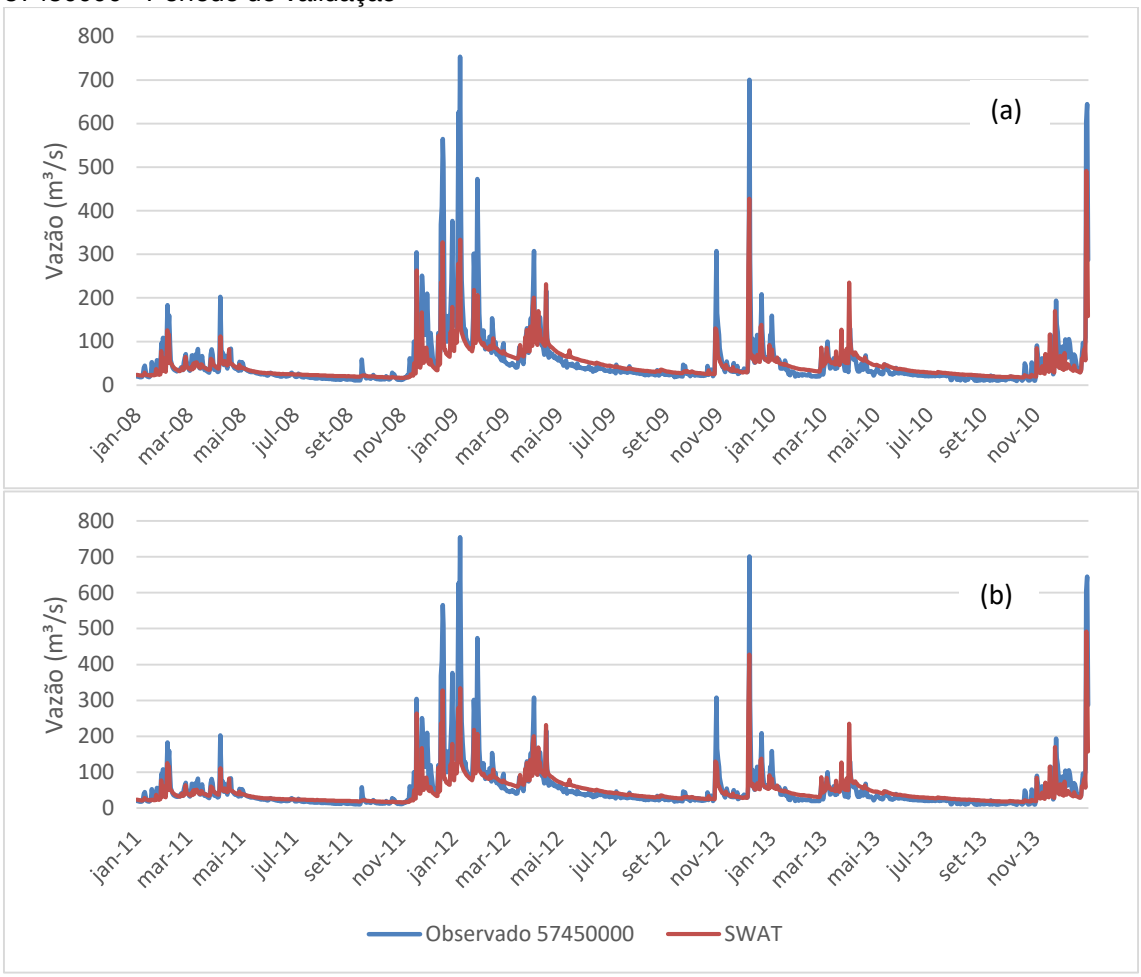
Fonte: o autor.

Figura I5 - Comparação das vazões observada e simuladas pelo modelo MGB - Estação fluviométrica 57450000 - Período de validação



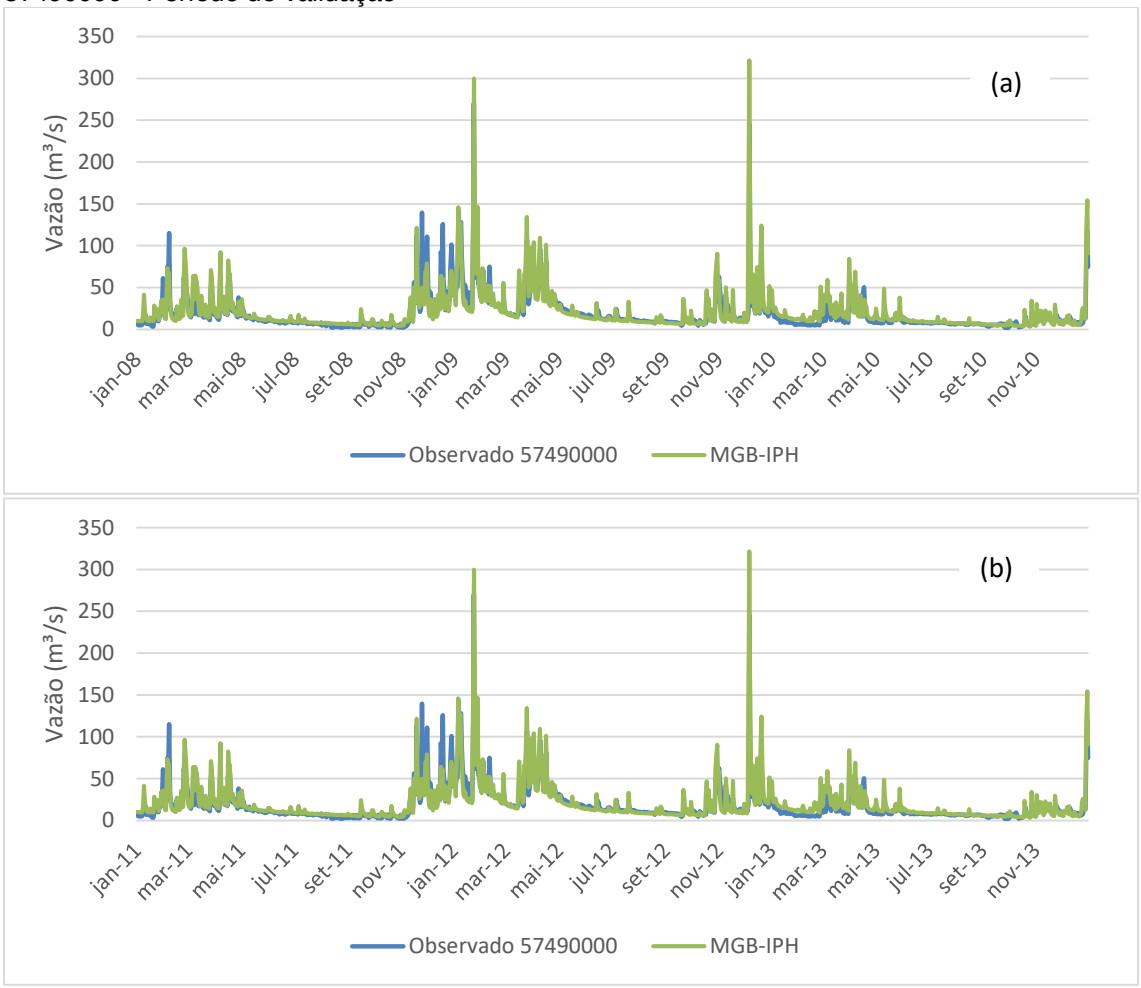
Fonte: o autor.

Figura I6 - Comparação das vazões observada e simuladas pelo modelo SWAT - Estação fluviométrica 57450000 - Período de validação



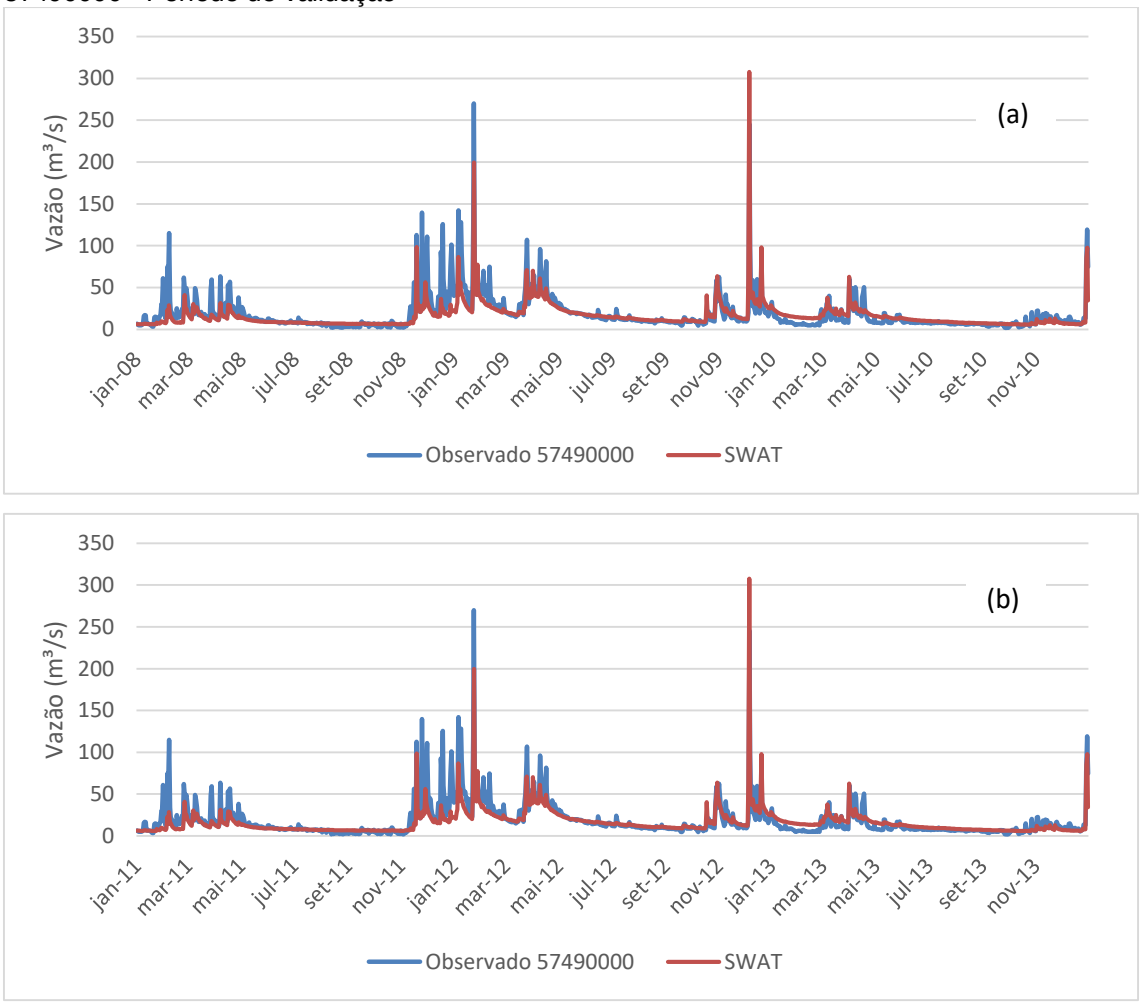
Fonte: o autor.

Figura I7 - Comparação das vazões observada e simuladas pelo modelo MGB - Estação fluviométrica 57490000 - Período de validação



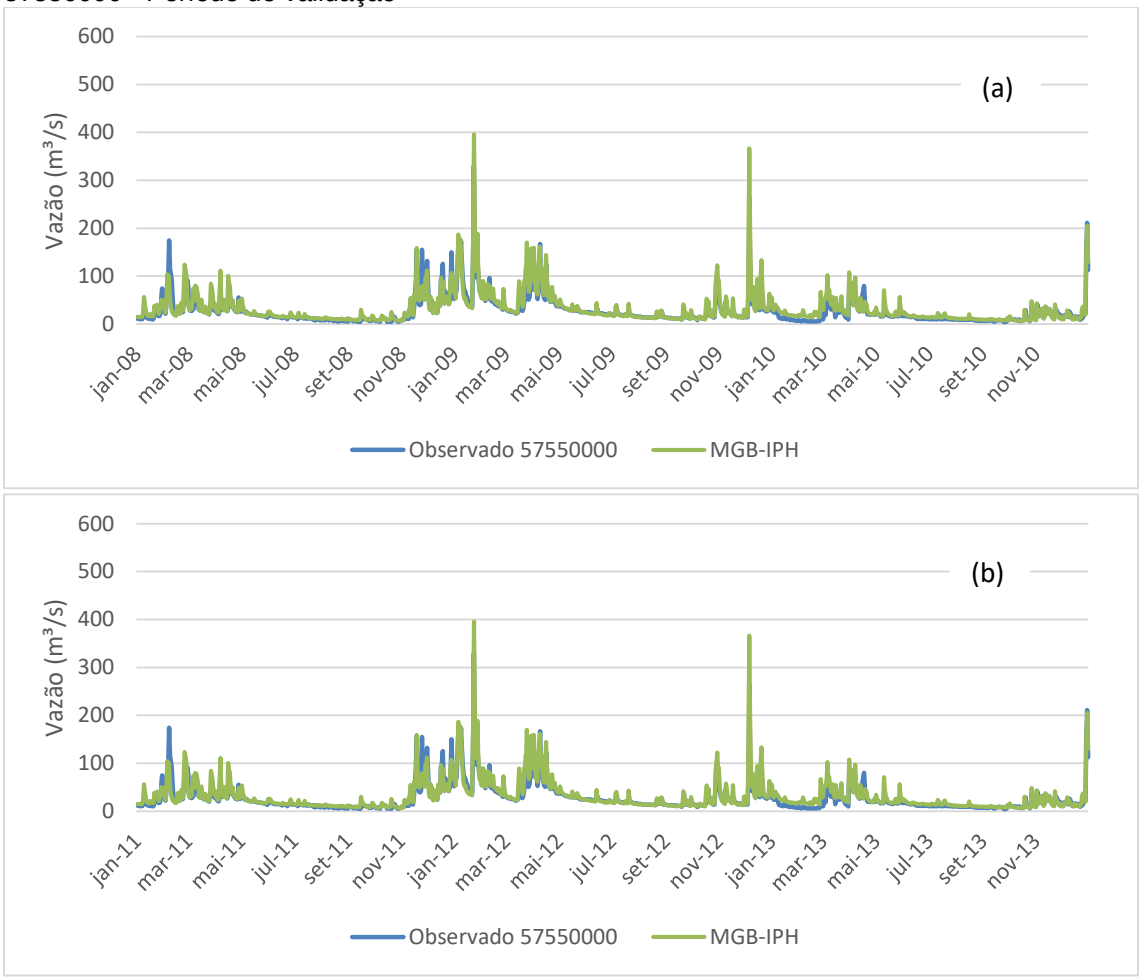
Fonte: o autor.

Figura I8 - Comparação das vazões observada e simuladas pelo modelo SWAT - Estação fluviométrica 57490000 - Período de validação



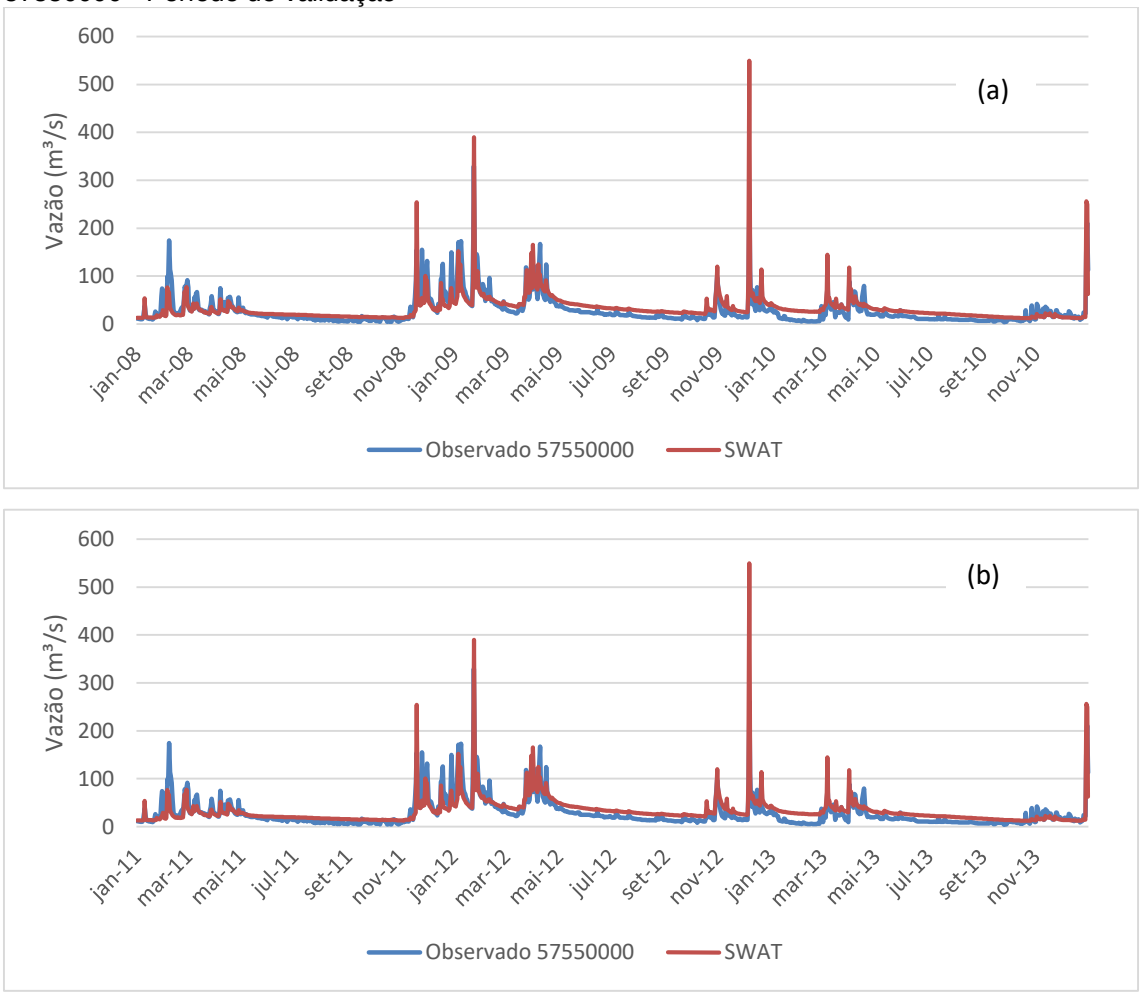
Fonte: o autor.

Figura I9 - Comparação das vazões observada e simuladas pelo modelo MGB - Estação fluviométrica 57550000 - Período de validação



Fonte: o autor.

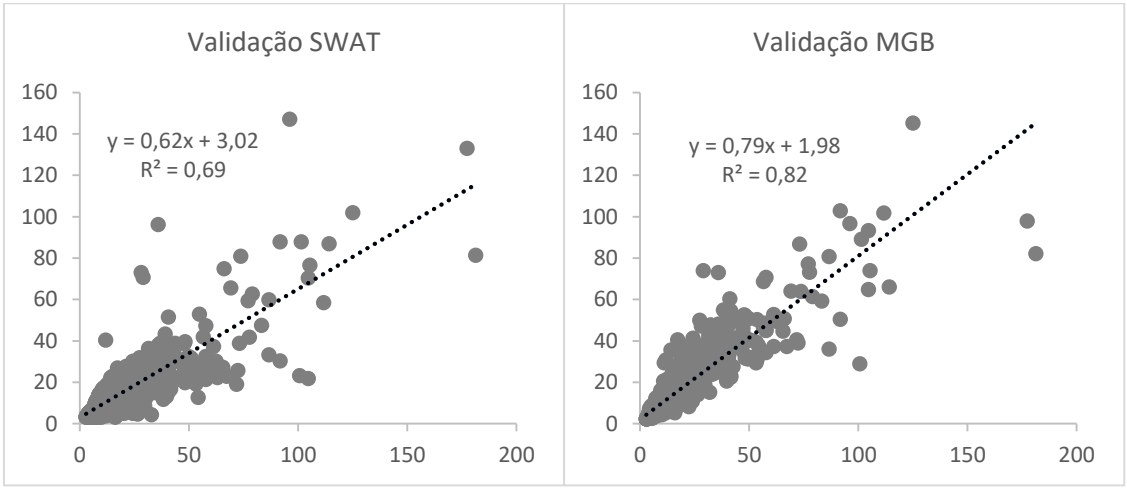
Figura I10 - Comparação das vazões observada e simuladas pelo modelo SWAT - Estação fluviométrica 57550000 - Período de validação



Fonte: o autor.

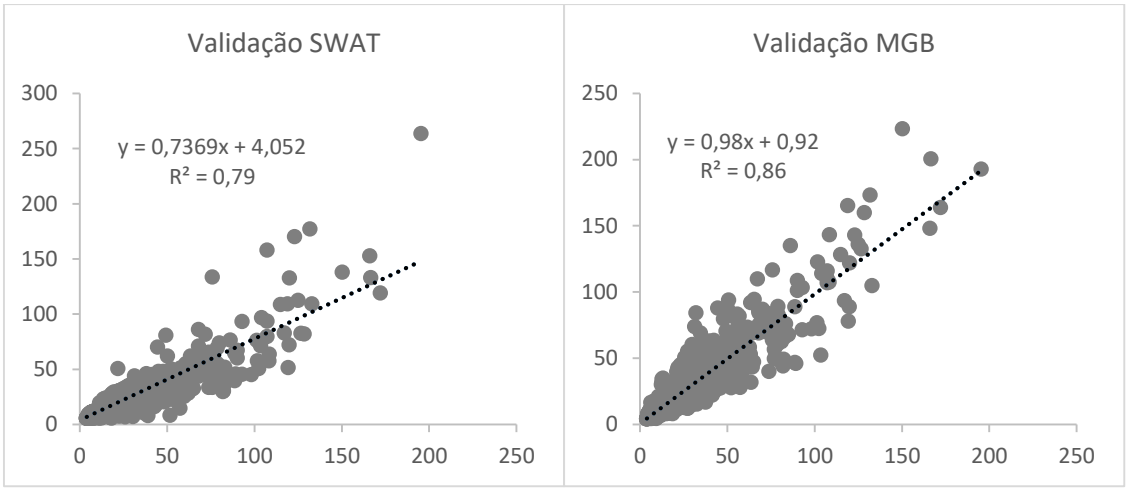
ANEXO J – CORRELAÇÃO ENTRE VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS PELO SWAT E PELO MGB - PERÍODO DE VALIDAÇÃO

Figura J1 - Correlação entre vazões estimadas e observadas para o período de validação - Ponto de monitoramento 57370000



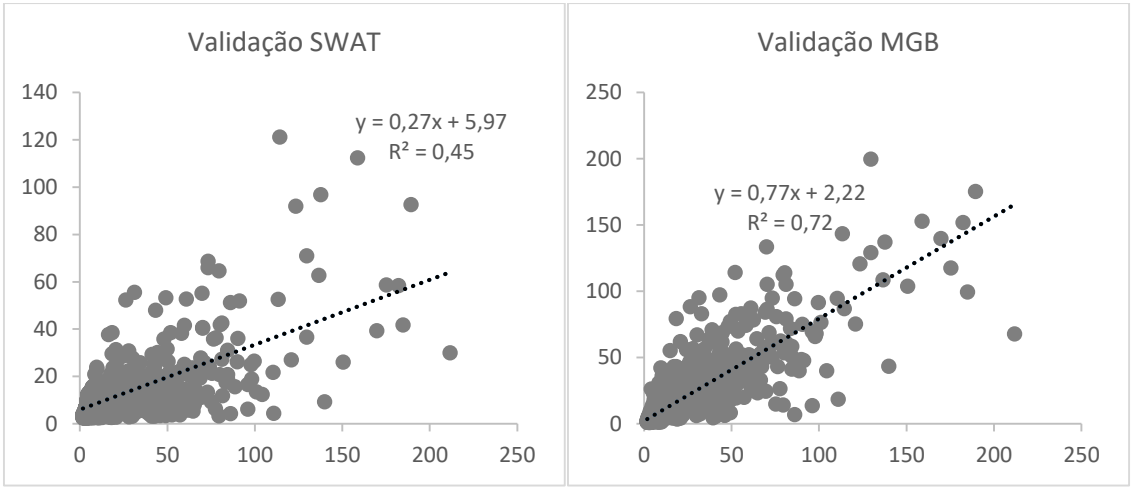
Fonte: o autor.

Figura J2 - Correlação entre vazões estimadas e observadas para o período de validação - Ponto de monitoramento 57400000



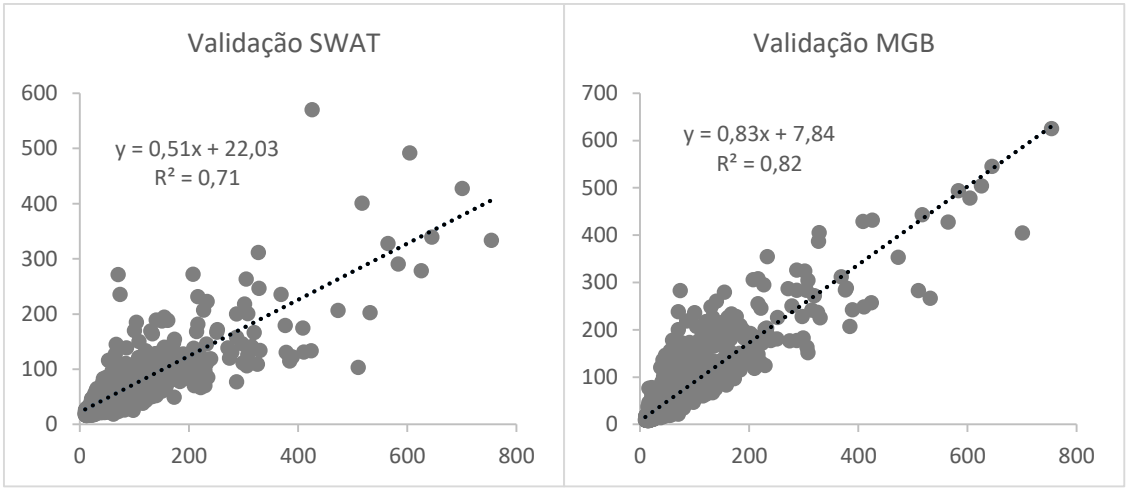
Fonte: o autor.

Figura J3 - Correlação entre vazões estimadas e observadas para o período de validação - Ponto de monitoramento 57420000



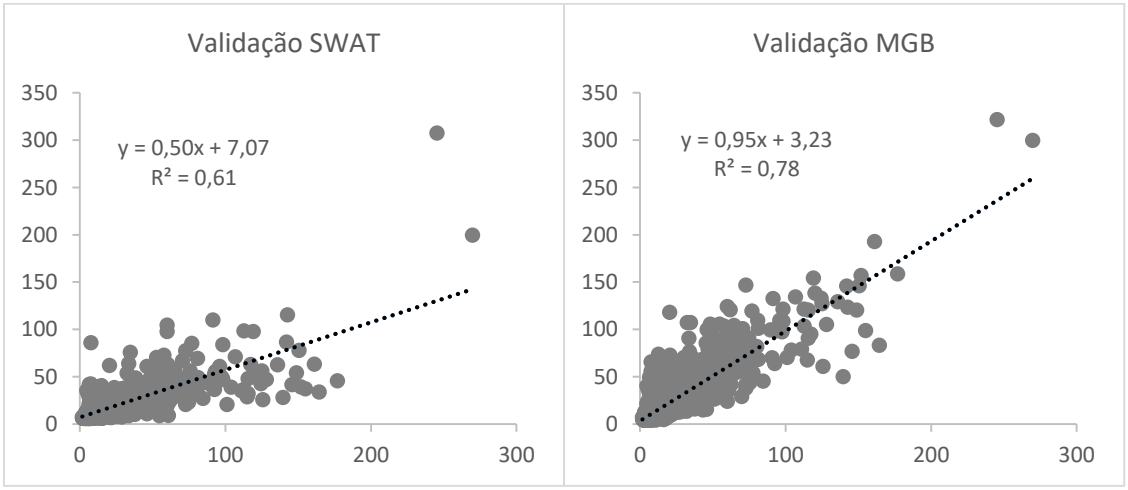
Fonte: o autor.

Figura J4 - Correlação entre vazões estimadas e observadas para o período de validação - Ponto de monitoramento 57450000



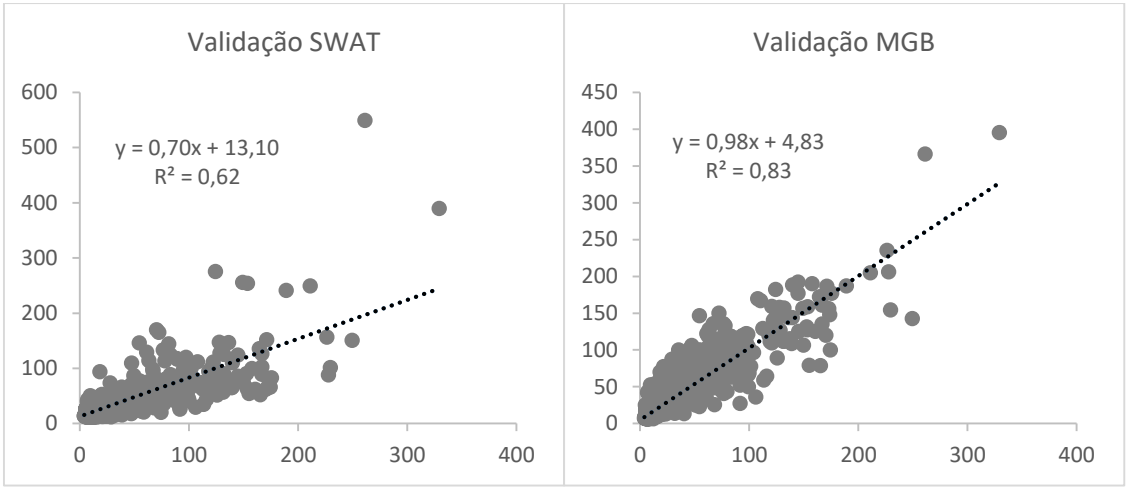
Fonte: o autor.

Figura J5 - Correlação entre vazões estimadas e observadas para o período de validação - Ponto de monitoramento 57490000



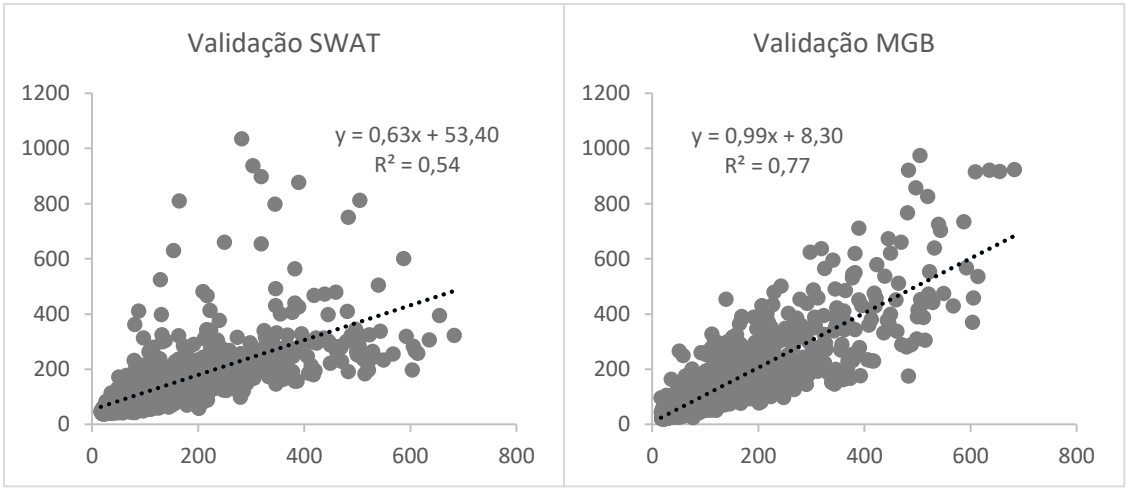
Fonte: o autor.

Figura J6 - Correlação entre vazões estimadas e observadas para o período de validação - Ponto de monitoramento 57550000



Fonte: o autor.

Figura J7 - Correlação entre vazões estimadas e observadas para o período de validação - Ponto de monitoramento 57580000



Fonte: o autor.

ANEXO K – CORRELAÇÃO ENTRE VAZÕES SIMULADAS PELO SWAT E PELO MGB

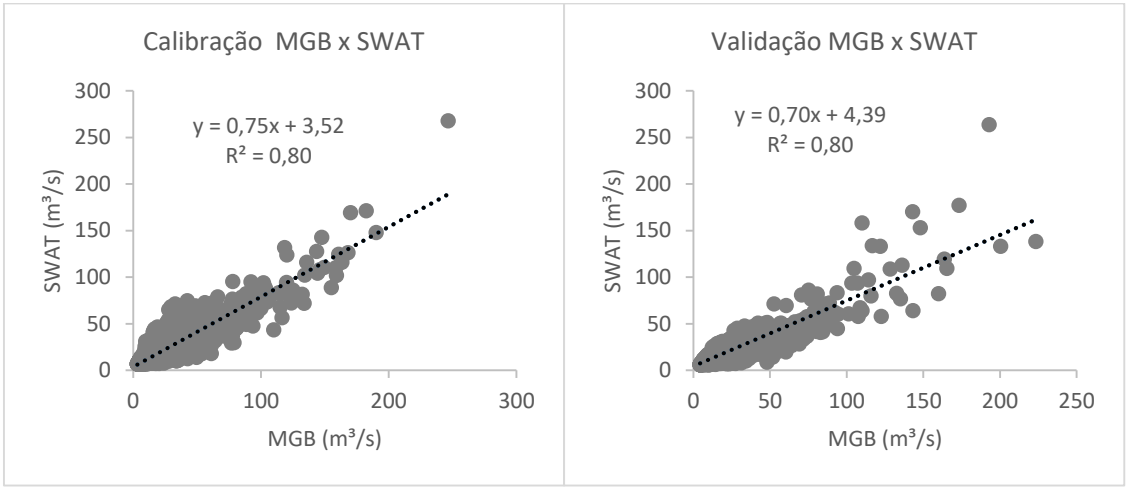


Figura K1 - Correlação entre vazões estimadas pelos modelos SWAT e MGB para os períodos de calibração e validação - Ponto de monitoramento 57400000

Fonte: o autor.

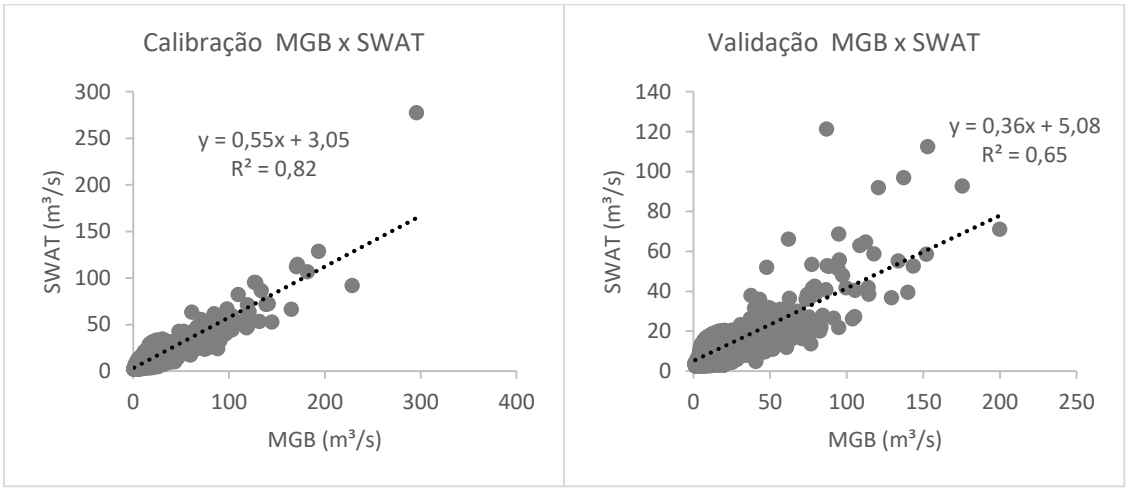


Figura K2 - Correlação entre vazões estimadas pelos modelos SWAT e MGB para os períodos de calibração e validação - Ponto de monitoramento 57420000

Fonte: o autor.

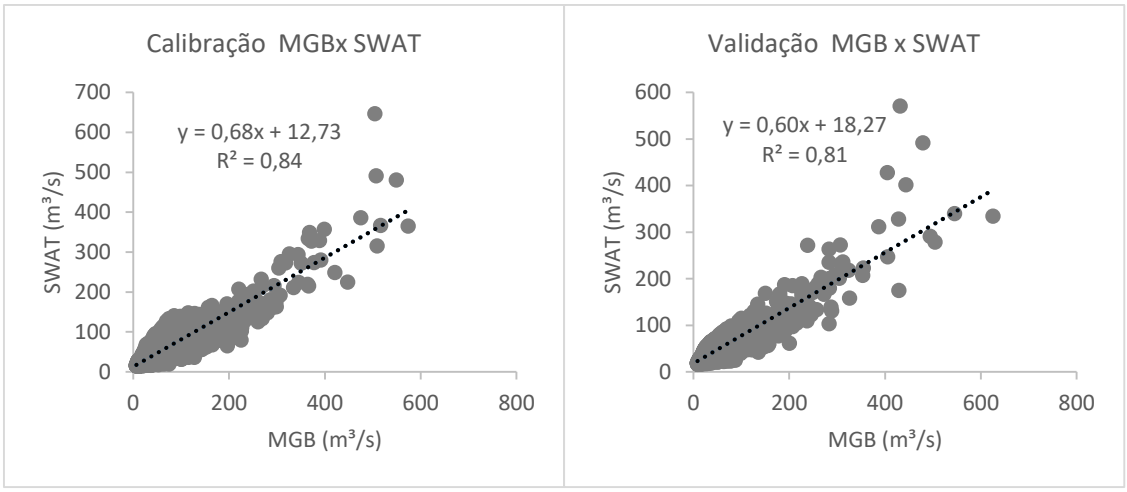


Figura K3 - Correlação entre vazões estimadas pelos modelos SWAT e MGB para os períodos de calibração e validação - Ponto de monitoramento 57450000
Fonte: o autor.

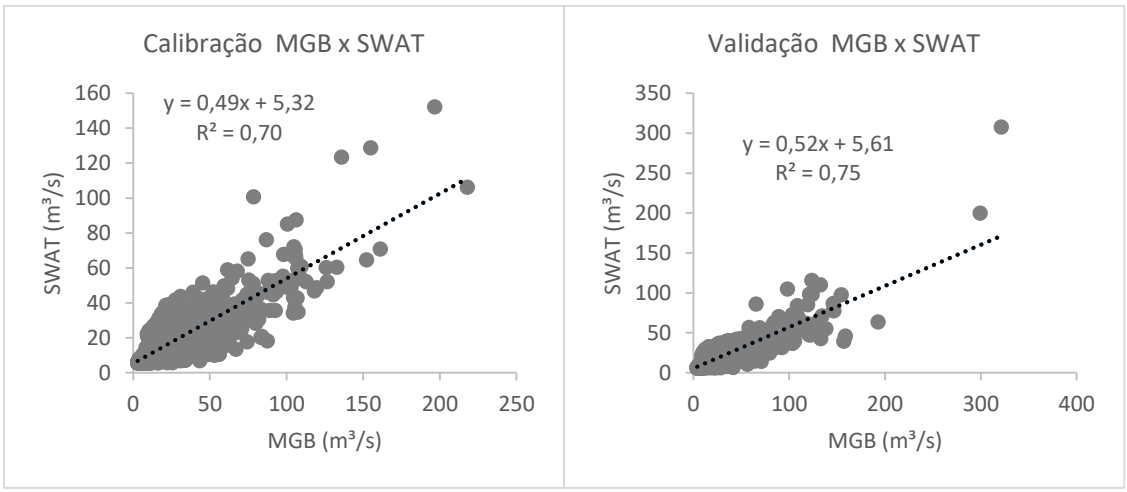


Figura K4 - Correlação entre vazões estimadas pelos modelos SWAT e MGB para os períodos de calibração e validação - Ponto de monitoramento 57490000
Fonte: o autor.

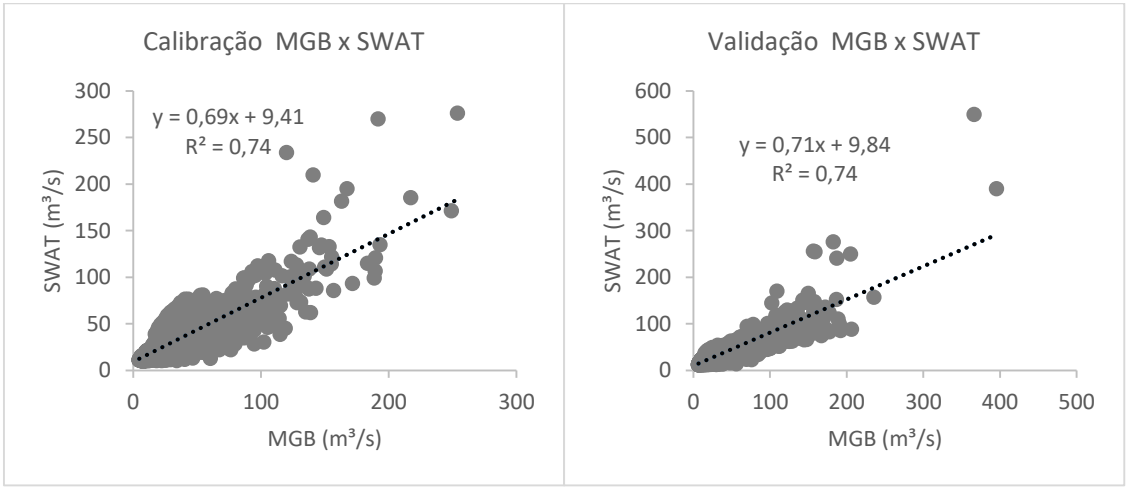


Figura K5 - Correlação entre vazões estimadas pelos modelos SWAT e MGB para os períodos de calibração e validação - Ponto de monitoramento 57550000
Fonte: o autor.