

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
CURSO DE ENGENHARIA HÍDRICA

**PEDRO LUIS BERNARDI DE CAMARGO**

**IMPLEMENTAÇÃO DE GATILHOS PARA SIMULAÇÃO DA  
PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS POR MOVIMENTOS DE  
MASSA NO MGB-SED**

PORTO ALEGRE

2022

**PEDRO LUIS BERNARDI DE CAMARGO**

**IMPLEMENTAÇÃO DE GATILHOS PARA SIMULAÇÃO DA  
PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS POR MOVIMENTOS DE  
MASSA NO MGB-SED**

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Hídrica apresentado Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Hídrico.

**Orientado: Fernando Mainardi Fan**

PORTO ALEGRE

2022

### CIP - Catalogação na Publicação

De Camargo, Pedro Luis Bernardi  
IMPLEMENTAÇÃO DE GATILHOS PARA SIMULAÇÃO DA  
PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS POR MOVIMENTOS DE MASSA NO  
MGB-SED / Pedro Luis Bernardi De Camargo. -- 2022.  
104 f.  
Orientador: Fernando Mainardi Fan.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto  
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia Hídrica,  
Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Sedimentos. 2. Movimentos de Massa. 3.  
Hidrologia de Grande Escala. 4. Rio dos Sinos. 5.  
Modelagem Hidrossedimentológica. I. Fan, Fernando  
Mainardi, orient. II. Título.

**PEDRO LUIS BERNARDI DE CAMARGO**

**IMPLEMENTAÇÃO DE GATILHOS PARA SIMULAÇÃO DA  
PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS POR MOVIMENTOS DE  
MASSA NO MGB-SED**

Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Hídrica apresentado Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Hídrico.

Aprovado em: Porto Alegre, 11 de outubro de 2022

---

Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan – UFRGS/IPH  
Orientador

---

Prof. Dr. Gean Paulo Michel – UFRGS/IPH  
Examinador

---

Dr. Hugo de Oliveira Fagundes  
Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

Meus mais sinceros agradecimentos:

Primeiramente agradecer aos meus pais André e Cecília por todo amor, carinho, suporte que recebi desde pequeno, sem isso com certeza não teria chegado tão longe, sem esquecer da minha irmã, Juliana a quem sempre auxiliou e apoiou, fazendo seu papel de irmã mais nova, brincadeira.

À minha namorada Ana Luiza, por estar sempre comigo, me apoiar e conversar os mais diversos assuntos e me ajudar a relaxar em momentos de muito estresse.

Aos meus avós, Victo, Suely e Andrela, um grande obrigado, suas palavras de incentivo, mesmo o cuidado e afeto comigo sempre me ajudaram a seguir em frente.

Aos meus amigos e amigas da graduação ou não, que de alguma forma participaram desta jornada, seja a distância ou próximos, meus sincero obrigado, vocês conseguiram tornar momentos complexos e difíceis em momentos triviais e por vezes tranquilos.

Aos professores do IPH de modo geral, obrigado pelas aulas e valiosos ensinamentos, em especial aos professores: Fernando Fan, Gean Paulo Michel, Rafael Manica, Ana Luiza Borges, Anderson Ruhoff e Maurício Paixão que de alguma forma auxiliaram durante o curso de Engenharia Hídrica, seja em questões de aulas, iniciação científica, empresa júnior, estágio ou mesmo jogando conversa fora.

Por fim, meu muito obrigado aos funcionários e terceirizados do IPH e UFRGS, sempre que precisei me auxiliaram da melhor forma possível, de forma direta, educada e gentil.

*Você é bem-vindo a especular o que o amanhã trará.*

*(Gandalf)*

## RESUMO

CAMARGO, P, L, B. **Implementação de gatilhos para a simulação da produção de sedimentos por movimentos de massa.** Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Hídrica) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

Dados hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas são escassos e de difícil obtenção, isso torna a modelagem matemática uma alternativa auxiliar para realização da gestão integrada dos recursos hídricos e minimização de impactos provenientes do ciclo hidrossedimentológico. Na modelagem hidrossedimentológica, eventos extremos, como movimentos de massa são de difícil mensuração quanto a deflagradores e aporte de sedimentos, sendo assim este trabalho visa a obtenção de deflagradores para movimentos de massa na bacia do rio dos Sinos, utilizando o modelo hidrossedimentológico MGB-SED. A bacia do rio dos Sinos sofreu eventos de movimentos de massa próximos ao município de Rolante – RS em janeiro de 2017. O MGB-SED foi desenvolvido a partir do acoplamento do módulo de sedimentos ao modelo hidrológico MGB, sendo sua equação principal a MUSLE. A calibração do modelo foi realizada para os parâmetros K (fator de erodibilidade do solo) e C (fator de manejo e uso do solo), com a metodologia de calibração manual por tentativa e erro. Os valores de descarga sólida em suspensão simulados foram comparados aos valores observados nos dados do portal “Hidroweb”, da Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA), utilizando dados de 2 estações sedimentométricas ao longo da bacia, sendo o período simulado de 2010 até 2020, por conter dados disponíveis em ambas estações. Para a validação do modelo foi utilizado o período entre 1997 a 2007, porém apenas uma das estações apresentava dados disponíveis. A validação foi realizada comparando os resultados observados e simulados sem alteração nos parâmetros obtidos durante a calibração. Por conta da baixa quantidade de dados disponíveis, não se mostrou uma boa opção a diminuição do período de calibração e validação, afim de usar ambas estações nas métricas. As métricas de desempenho utilizadas na calibração e validação foram o Nash-Sutcliffe (NSE), Correlação de Pearson ( $r$ ) e Erro de Volume ( $\Delta V$ ), com a calibração e validação apresentando valores satisfatórios a bons. O MGB-SEDmm foi definido com dois gatilhos, um pluviométrico (Plu) e um sobre o fator topográfico acumulado (LSacu) e, um multiplicador sobre o valor final de sedimentos produzidos, neste modelo foram realizadas 19 simulações, com período entre 2010 e 2020, com as novas variáveis sendo alteradas entre 4 a 6 vezes para obtenção da melhor representação da produção de sedimentos por movimentos de massa na bacia do rio do Sinos. Os resultados foram comparados com os resultados obtidos no MGB-SED, para análise da diferença gerada pelos gatilhos. Na comparação das 19 simulações realizadas com a combinação dos gatilhos mais restritivos,  $Plu > 100$  e  $LSacu > 90000$  foram as que geraram aumentos na produção de sedimentos, apenas, próximo ao período do evento de movimentos de massa que ocorreram em Rolante-RS em janeiro de 2017.

**Palavras-chave:** Hidrologia de Grande Escala, Modelagem Hidrossedimentológica, Modelo MGB, Movimentos de Massa, Rio dos Sinos.

## ABSTRACT

CAMARGO, P, L, B. **Implementation of triggers for the simulation of sediment production by mass movements**. Diploma Work. (Graduation in Hydraulic Engineering) – Hydraulic Research Institute. Federal University of Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2022.

Hydrosedimentological data in hydroelectric basins are scarce and easy hydrographic data, this makes mathematical modeling an auxiliary alternative for carrying out the integrated management of water resources, minimizing impacts from the sedimentological cycle. In hydrossed modeling, as the movements of extreme events, such as mass movements are difficult to measure in terms of triggers and sediment input, so this work visalogical to triggers for mass movements in the Sinos River, the use of basin or the transport of MGB-SED sediments. Rio de Janeiro 2017 modified the movements of the bells for the nearby mass – RS in January 2017 MGB-SED was developed from the advancement of the sediment module to the model to the hydrological MGB, with its main basin to the MGBLE. The model operation performed for the parameters K (soil method erodibility factor) and C (manual operation factor by and error). The simulated suspended solid discharge lengths were simulated at the values observed in the compared data from the “Hidroweb” portal, from the National Water and Sanitation Agency (ANA), using data from 2 sedimentometric stations to the basin, being the period from 2010 to 2020, by data available in both stations. For the validation of the model, it was used in the period between 1997 and 2007, but only one of the stations had available data. Validation was performed during observed and simulated results performed during manipulation of results. Due to the low amount of availability, it was not a good option to increase the period of data use and validation, in order to measure both stations. The performance and performance measurements performed and validation were the NaSudo of Volumeson (NSE), presenting the performance correction (NSE) with an evaluation success (NSE) The MGB-SEDmm was defined with two triggers, one pluviometric (Plu) and one on the topographic factor (LSacu) and, a multiplier on the final sediment value, in this model 19 simulations were launched, with a period between 2010 and 2020, with the new variables being changed 4 to 6 times for the best representation of sediment production by mass movements in the Rio dos Sinos basin. The results obtained were compared with the MGB-ED results, obtained for analysis of the difference by the triggers. In the comparison 19 simulations performed with more than 19 restrictive triggers and LSa>1900 were generated, only from the 19 most restrictive simulations, plurals>1900 in sediment production, only from the simulations to the period of the event of mass movements close that increased in January in Roller-RS of 2017.

**Palavras-chave:** Large-Scale Hydrology, Hydrosedimentological Modeling, MGB Model, Mass Movements, Rio dos Sinos.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação dos cinco tipos de movimentos de massa: Rastejos, escorregamentos, corridas e queda de blocos. Fonte: Negrão e Campanha (USP).....	21
Figura 2 - Deslocamento das partículas no curso d'água. Fonte: (MARCONDES, 2011).....	23
Figura 3 - Zonas de sedimentos em um rio. Fonte: (MILLER, 1990).....	24
Figura 4 - Representação esquemática do modelo hidrológico MGB. Fonte: Fagundes (2018).....	27
Figura 5 - Esquema dos processos de geração e propagação de sedimentos das minibacias e propagação de sedimentos na rede de drenagem. Fonte: Buarque (2015).....	30
Figura 6 - Fluxograma da metodologia utilizada no estudo.....	34
Figura 7 - Localização da bacia do Sinos.....	35
Figura 8 - Mapa das Unidade de Resposta Hidrológica para a bacia do Sinos.....	36
Figura 9 - Mapa de tipos de solos da FAO com às classes de solo da EMBRAPA.....	37
Figura 10 - Mapa das estações utilizadas na modelagem.....	39
Figura 11 - Elevação da bacia do Sinos.....	40
Figura 12 - Mapa com o resultado do processamento para as direções de fluxo da bacia.....	41
Figura 13 - Mapa com o resultado do processamento para as direções de fluxo acumulada da bacia..	41
Figura 14 - Rede de drenagem sintética para a bacia do Sinos.....	42
Figura 15 - Mapa das 276 minibacias geradas para a bacia do Rio dos Sinos.....	43
Figura 16 - Mapa das 6 sub-bacias geradas para a bacia do Rio dos Sinos.....	43
Figura 17 - Pluviograma das 3 estações mais próximas ao município de Rolante-RS e limiares dos gatilhos propostos.....	52
Figura 18 - Declividades da bacia do Rio dos Sinos.....	53
Figura 19 – Minibacias com fator LS acumulado acima de 110000 em uma URH, sobre mapa da declividade da bacia.....	53
Figura 20 - Minibacias com fator LS acumulado acima de 100000 em uma URH, sobre mapa da declividade da bacia.....	54
Figura 21 - Minibacias com fator LS acumulado acima de 90000 em uma URH, sobre mapa da declividade da bacia.....	54
Figura 22 - Minibacias com fator LS acumulado acima de 80000 em uma URH, sobre mapa da declividade da bacia.....	55
Figura 23 – Hidrogramas observados e simulados no período de calibração, na estação Taquara Montante (87374000).....	60
Figura 24 – Hidrogramas observados e simulados no período de calibração, na estação Campo Bom (87380000).....	61

Figura 25 – Hidrogramas observados e simulados no período de calibração, na estação São Leopoldo (87382000). .....	62
Figura 26 – Hidrogramas observados e simulados no período de validação, na estação Taquara Montante (87374000). .....	63
Figura 27 – Hidrogramas observados e simulados no período de validação, na estação Campo Bom (87380000). .....	64
Figura 28 – Hidrogramas observados e simulados no período de validação, na estação São Leopoldo (87380000). .....	65
Figura 29 – Descarga sólida em suspensão simulada e observada no período de calibração, na estação Taquara Montante (87374000). .....	68
Figura 30 - Descarga sólida em suspensão observada pela simulada no período de calibração, na estação Taquara Montante (87374000). .....	69
Figura 31 - Descarga sólida em suspensão simulada e observada no período de calibração, na estação Campo Bom (87380000). .....	70
Figura 32 - Descarga sólida em suspensão observada pela simulada no período de calibração, na estação Campo Bom (87380000). .....	70
Figura 33 – Descarga sólida em suspensão simulada e observada no período de validação, na estação Campo Bom (87380000). .....	72
Figura 34 – Descarga sólida em suspensão simulada e observada no período de validação, na estação Campo Bom (87380000) sem o dado considerado espúrio. ....	72
Figura 35 - Descarga sólida em suspensão observada pela simulada no período de validação, na estação Campo Bom (87380000). .....	73
Figura 36 - Descarga sólida em suspensão observada pela simulada no período de validação, na estação Campo Bom (87380000) sem o dado considerado espúrio. ....	73
Figura 37 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED, MEGB-SEDmm no período de estudo, na estação Taquara Montante (87374000). .....	76
Figura 38 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED, MEGB-SEDmm no período de estudo, na estação Campo Bom (87380000). .....	76
Figura 39 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 60 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante (87374000). .....	77
Figura 40 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 80 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante (87374000). .....	78
Figura 41 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante (87374000). .....	79

Figura 42 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 60 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom (8738000). .....	80
Figura 43 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 80 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 800000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom (8738000). .....	81
Figura 44 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom (8738000). .....	82
Figura 45 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 110000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante (87374000). .....	83
Figura 46 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 100000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante (87374000). .....	83
Figura 47 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 90000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante (87374000). .....	84
Figura 48 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 110000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom (87380000). .....	85
Figura 49 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 100000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom (87380000). .....	85
Figura 50 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 90 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 90000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom (87380000). .....	86
Figura 51 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 15 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante (87374000). .....	87
Figura 52 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 20 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante (87374000). .....	88

Figura 53 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 15 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom (87380000). .....	89
Figura 54 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 20 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom (87380000). .....	89
Figura 55 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 60 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 110000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante.....	97
Figura 56 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 60 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 110000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom.....	97
Figura 57 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 80 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 110000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante.....	98
Figura 58 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 80 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 110000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom.....	98
Figura 59 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 60 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 100000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante.....	99
Figura 60 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 60 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 100000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom.....	99
Figura 61 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 80 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 100000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante.....	100
Figura 62 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 80 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 100000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom.....	100
Figura 63 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 60 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 15 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante.....	101
Figura 64 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 60 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 15 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom.....	101

Figura 65 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 60 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 20 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante.....	102
Figura 66 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 60 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 20 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom.....	102
Figura 67 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 80 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 15 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante.....	103
Figura 68 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 80 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 15 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom.....	103
Figura 69 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 80 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 20 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante.....	104
Figura 70 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 80 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 20 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom.....	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estações pluviométricas e de sedimentos selecionadas no estudo.....	38
Tabela 2 - Período de calibração e validação do modelo hidrológico, MGB.....	44
Tabela 3 - Valores de albedo adotados no estudo. ....	45
Tabela 4 - Valores de índice de área foliar (IAF) adotados no estudo. ....	45
Tabela 5 - Valores de altura das árvores adotados no estudo.....	46
Tabela 6 - Valores de resistência superficial adotados no estudo. ....	46
Tabela 7 – Tipos de solos FAO presentes da bacia do Rio dos Sinos correlacionado com os tipos de solo da EMBRAPA e as porcentagens de areia, silte, argila e carbono orgânico. ....	48
Tabela 8 - Fator C definidos na bibliografia. ....	49
Tabela 9 - Resumo período e dados da calibração. ....	49
Tabela 10 - Resumo período e dados da validação. ....	49
Tabela 11 - Gatilhos pluviométricos de movimentos de massa na bibliografia.....	51
Tabela 12 - Faixas de avaliação adotadas para os modelos hidrológico e de sedimentos.....	57
Tabela 13 – Valores dos parâmetros calibráveis do MGB utilizados nas sub-bacias 1 e 6.....	58
Tabela 14 – Valores dos parâmetros calibráveis do MGB utilizados nas sub-bacias 2 e 4.....	59
Tabela 15 – Valores dos parâmetros calibráveis do MGB utilizados nas sub-bacias 3 e 5.....	59
Tabela 16 – Resumo dos resultados das métricas de desempenho para vazões simuladas, referente ao período de calibração. ....	62
Tabela 17 – Resumo dos resultados das métricas de desempenho para vazões simuladas, referente ao período de validação. ....	65
Tabela 18 – Comparação entre os valores das métricas de desempenho na calibração e validação. ....	66
Tabela 19 – Valores utilizados nos parâmetros calibráveis do modelo de sedimentos MGB-SED para as sub-bacias 1 e 6. ....	67
Tabela 20 – Valores utilizados nos parâmetros calibráveis do modelo de sedimentos MGB-SED para as sub-bacias 2 e 4. ....	67
Tabela 21 – Valores utilizados nos parâmetros calibráveis do modelo de sedimentos MGB-SED para as sub-bacias 3 e 5. ....	67
Tabela 22 - Resumo dos resultados das métricas de desempenho para a descarga sólida em suspensão simulada, referente ao período de calibração, o asterisco identifica a estação sem os dados possivelmente espúrios. ....	71
Tabela 23 – Resumo dos resultados das métricas de desempenho para a descarga sólida em suspensão simulada, referente ao período de validação, o asterisco identifica a estação sem o dado possivelmente espúrio. ....	74
Tabela 24 – Conjunto de testes com as variações de cada gatilho e multiplicador. ....	75

Tabela 25 - Comparação dos resultados das métricas de desempenho da descarga sólida em suspensão obtidas nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm, para o período de estudo, o asterisco identifica a estação sem os dados possivelmente espúrios..... 90

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1. GERAL.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2. ESPECÍFICOS .....</b>	<b>18</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1. EROSÃO E PERDA DE SOLO .....</b>	<b>19</b>
3.1.1. MOVIMENTOS DE MASSA .....	20
3.1.2. EQUACIONAMENTOS CLÁSSICOS PARA PERDA DE SOLOS E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS .....	21
<b>3.2. HIDROSEDIMENTOLOGIA .....</b>	<b>22</b>
3.2.1. SEDIMENTOS EM RIOS .....	22
<b>3.3. MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA.....</b>	<b>25</b>
3.3.1. O MODELO HIDROLÓGICO MGB.....	26
3.3.2. MODELO DE SEDIMENTOS MGB-SED.....	27
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>33</b>
<b>4.1. ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>34</b>
4.1.1. CARACTERIZAÇÃO DA BACIA .....	34
<b>4.2. MGB .....</b>	<b>39</b>
4.2.1. PRÉ-PROCESSAMENTO .....	39
4.2.2. DADOS HIDROLÓGICOS E METEOROLÓGICOS.....	44
4.2.3. PARÂMETROS FIXOS .....	44
4.2.4. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO .....	46
<b>4.3. MGB-SED .....</b>	<b>47</b>
4.3.1. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS .....	47
4.3.2. DADOS SEDIMENTOLÓGICOS .....	49
4.3.3. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO .....	49

<b>4.4. GATILHOS E MULTIPLICADOR PARA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS POR MOVIMENTOS DEMASSA .....</b>	<b>50</b>
4.4.1. GATILHO PLUVIOMÉTRICO .....	50
4.4.2. GATILHO FATOR LS ACUMULADO .....	52
4.4.3. MULTIPLICADOR.....	55
<b>4.5. MÉTODOS DE COMPARAÇÃO .....</b>	<b>55</b>
4.5.1. COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA DE NASH-SUTCLIFFE (NASH) .....	56
4.5.2. PORCENTAGEM DE ERRO DE VOLUME ( $\Delta V$ ).....	56
4.5.3. COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON ( $r$ ).....	56
4.5.4. FAIXAS DE QUALIDADE DAS MÉTRICAS DE DESEMPENHO.....	57
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>58</b>
<b>5.1. MBG-IPH.....</b>	<b>58</b>
5.1.1. CALIBRAÇÃO .....	58
5.1.2. VALIDAÇÃO.....	63
5.1.3. COMPARAÇÃO ENTRE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO .....	66
<b>5.2. MGB-SED .....</b>	<b>66</b>
5.2.1. PARÂMETROS FINAIS MUSLE .....	66
5.2.2. CALIBRAÇÃO .....	68
5.2.3. VALIDAÇÃO.....	71
<b>5.3. MGB-SEDmm .....</b>	<b>74</b>
5.3.1. GATILHOS E MULTIPLICADORES TESTADOS .....	75
5.3.2. MGB-SED X MGB-SEDmm .....	75
5.3.3. GATILHO PLUVIOMÉTRICO .....	77
5.3.4. GATILHO FATOR LS ACUMULADO .....	82
5.3.5. MULTIPLICADOR DA MUSLE .....	86
5.3.6. MÉTRICAS DE DESEMPENHO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	90
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>91</b>
<b>7. INDICAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>93</b>

<b>8. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>94</b>
<b>9. APÊNDICE – SIMULAÇÕES NÃO APRESENTADAS .....</b>	<b>97</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Esteves (1998), a erosão do solo é um fenômeno relevante para o meio ambiente e os recursos naturais, pois os sedimentos gerados nesse processo são fatores determinantes no assoreamento de rios e reservatórios, aumento da turbidez nas águas, redução da qualidade do terreno e da produtividade das culturas, resultando na degradação da terra, porém também são fatores importantes para manutenção de ecossistemas e organismos. Os processos erosivos ocorrem com diferentes magnitudes, desde a erosão ocasionada por gotas de precipitação até grandes movimentos de massas, sendo estes, eventos importantes dentro da dinâmica de evolução da paisagem. Eventos erosivos de grande magnitude geralmente provocam elevados prejuízos socioeconômicos e, por vezes ambientais, estes processos são desencadeados por uma série de condicionantes que se apresentam intrínsecos e correlacionados, de ordem natural, podendo ser potencializados pela ação antrópica (PINTO, 2013).

Com o avanço dos estudos sobre os fenômenos e o ciclo hidrossedimentológico foram desenvolvidos diversos equacionamentos e, posteriormente, modelos matemáticos de erosão e transporte de sedimentos que auxiliam na compreensão e representação dos fenômenos hidrossedimentológicos, bem como na avaliação de seus impactos (FAGUNDES, 2018). Segundo Buarque (2015), esses modelos matemáticos, sejam eles empíricos, conceituais ou de base física, foram inicialmente desenvolvidos com dois enfoques principais: o primeiro, a estimativa da produção de sedimentos em pequenas áreas; e o segundo voltado para o transporte na rede de drenagem, envolvendo os processos de erosão e deposição no canal. Dessa forma Buarque (2015) acopla ao modelo hidrológico MGB (COLLISCHONN, et al., 2007) a metodologia de geração e transporte de sedimentos, possibilitando uma representação satisfatória dos processos hidrossedimentológicos em redes de drenagem da América Latina.

Apesar dos avanços nos estudos e na modelagem hidrossedimentológica, os modelos utilizam na concepção, a Equação Universal de Perda de Solo (WISCHMEIER; SMITH, 1978) e suas derivações foram amplamente utilizadas (BUARQUE, 2015), esse tipo de equação foi idealizado para erosões em níveis pequenos, dessa forma, eventos extremos como movimentos de massa não são representados. Assim, aprimoramentos na modelagem hidrossedimentológica para a representação de movimentos de massa se mostra um fator importante, visto a quantidade de sedimentos erodido e transportado no curso hídrico.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. GERAL**

Propor e avaliar gatilhos deflagradores simplificados para simulação de produção de sedimentos por movimentos de massa no modelo hidrossedimentológico MGB-SED.

### **2.2. ESPECÍFICOS**

- Avaliar a adequação dos valores encontrados na modelagem hidrológica, em termos de correlação e tendência média dos dados observados em relação aos dados simulados e possíveis melhorias na metodologia de calibração do modelo;
- Avaliar se os valores encontrados na simulação hidrossedimentológica estão de acordo com os valores médios encontrados na literatura e dados medidos in situ;
- Avaliar se os resultados dos gatilhos propostos representam de modo satisfatório os eventos de movimento de massa ocorrido em Rolante - RS, no dia 05/01/2017.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica dos principais conceitos teóricos utilizados neste trabalho, erosão, movimentos de massa, hidrossedimentologia, modelagem hidrológica e hidrossedimentológica. Esta revisão procura analisar trabalhos já produzidos que envolvam os assuntos relacionados a este estudo e apresentar as definições de conceitos abordados ao longo do estudo.

#### 3.1. EROSÃO E PERDA DE SOLO

Erosão é o processo de desprendimento e conseqüentemente arraste acelerado das partículas do solo causado pela água e pelo vento, causando o depauperamento acelerado das terras (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1999). Santos (2004) simplifica o conceito e define erosão como o processo pelo qual há remoção de uma massa de solo de um local, transporte e conseqüente deposição em outros. Assim Carvalho (2008) determina as principais fontes de erosão como:

- Erosão eólica, aquela causada pela ação vento no solo;
- Erosão fluvial, é causada pela ação das correntes dos rios, causando erosão de leito e/ou margens;
- Erosão hídrica, causada pela ação da água no solo;
- Erosão por remoção de massa, esse tipo de erosão corresponde aos movimentos de grandes quantidades de solo e rochas sob a influência combinada da gravidade e saturação de água no solo.

A erosão hídrica pode ainda ser subdivida em diversas outras, em virtude dos fatores que afetam sua ocorrência, tais como: clima, intensidade e frequência das chuvas, a topografia, as características do solo e de sua cobertura e medidas de conservação adotadas pelo homem que maneja o solo (CARVALHO, 2008; PANDEY et al., 2016). Assim, segundo Carvalho (2008), os principais tipos de erosão hídrica são:

- Erosão por splash é a desagregação das partículas do solo produzida pelo impacto das gotas de chuva em superfícies desprotegidas;
- Erosão laminar é aquela que ocorre devido aos efeitos do escoamento superficial decorrente das precipitações, quando, geralmente, a camada mais superficial do solo já se encontra saturada, sendo produzido um desgaste suave e uniforme em toda a extensão da camada superficial do solo;

- Erosão em sulcos é gerada por um escoamento difuso, caracterizada por filetes de água que se dividem em braços que se espalham e se juntam continuamente. Esse tipo de erosão pode ocorrer mesmo na presença de vegetação;
- Erosão por escoamento concentrado é aquela que formará as voçorocas. A erosão pode ser provocada por falta de boa estrutura de solo com camada impermeável profunda.

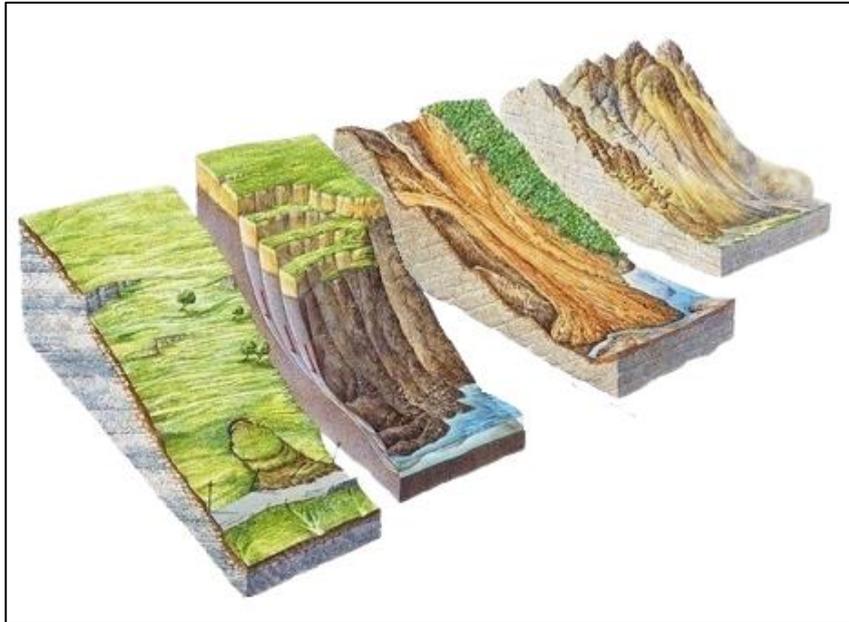
A erosão do solo é uma grande preocupação para o meio ambiente e os recursos naturais, levando à redução da produtividade do campo e da qualidade do solo, resultando na degradação da terra (PANDEY, 2016), é também fonte de sedimentos e poluentes que afetam negativamente ecossistemas aquáticos, além disso o assoreamento de córregos, rios e reservatórios aumenta a frequência de inundações e reduz a vida útil de hidrelétricas (BUARQUE, 2015). Por outro lado, a presença dos sedimentos pode ser importante para alguns ecossistemas pois também são responsáveis pelo transporte de nutrientes, importantes para diversos organismos (ESTEVES, 1998).

#### 3.1.1. MOVIMENTOS DE MASSA

Movimento de massa é o movimento do solo, rocha e/ou vegetação ao longo da vertente sob a ação direta da gravidade. A contribuição de outro meio, como água ou gelo se dá pela redução da resistência dos materiais de vertente e/ou pela indução do comportamento plástico e fluido dos solos (TOMINAGA, 2009). Os movimentos de massa são divididos em cinco tipos: corrida, escorregamento, rastejo e quedas, sendo a divisão feita com base na dinâmica, geometria e/ou material presente no fluxo (FILHO, 1992):

- Rastejos são movimentos lentos e contínuos de material de encostas com limites indefinidos. Envolvem, muitas vezes, grandes volumes de solos, sem que apresente uma diferenciação visível entre o material em movimento e o estacionário;
- Escorregamentos são movimentos rápidos, de porções de terrenos (solos e rochas), com volumes definidos, deslocando-se sob ação da gravidade, para baixo e para fora do talude ou da vertente;
- Corridas são formas de escoamento de caráter essencialmente hidrodinâmico, ocasionadas pela perda de atrito interno das partículas de solo, em virtude da destruição de sua estrutura interna, na presença de excesso de água;

- Queda de blocos é a ação de queda livre a partir de uma elevação, com ausência de superfície de movimentação. Nos penhascos ou taludes íngremes, blocos e/ou lascas dos maciços rochosos deslocados pelo intemperismo, caem pela ação da gravidade.



*Figura 1 - Representação dos cinco tipos de movimentos de massa: Rastejos, escorregamentos, corridas e queda de blocos.  
Fonte: Negrão e Campanha (USP).*

### 3.1.2. EQUACIONAMENTOS CLÁSSICOS PARA PERDA DE SOLOS E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

Segundo Buarque (2015) as tentativas de estimar matematicamente a erosão do solo iniciaram décadas atrás, com equações empíricas que consideram efeitos de fatores que influenciam na erosão, tais como, energia da chuva, propriedades do solo, topografia e cobertura do solo.

Dentre os equacionamentos para a estimativa de perda de solo a equação mais utilizada é a USLE (Universal Soil Loss Equation) (Wischmeier & Smith, 1965) e as equações derivadas da mesma para produção de sedimentos como a MUSLE (Williams, 1975), RUSLE (Renard et al., 1997), USLE-M (Kinnell & Risse, 1998) (BUARQUE, 2015; FAGUNDES, 2018).

Pandey et al. (2016), define a USLE como resultante de um extenso trabalho experimental, e sendo a realização suprema no campo da modelagem de erosão do solo. Ressalta-se, no entanto, que esse modelo não considera processos de erosão que envolvam grandes movimentos de massa em curtos intervalos de tempo, como erosão por voçorocas e movimentos de massa (FAGUNDES, 2018).

### 3.1.2.1. USLE

A USLE estima a média anual de longo período da perda de solo em erosão laminar e sulcos usando seis fatores associados ao clima, solo, topografia vegetação e uso e manejo do solo (BUARQUE, 2015). A equação é dada abaixo:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

*Equação 1*

Onde A é a perda de solo calculada por unidade de área (t/ha); R é o fator de erosividade da chuva ( $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ); K é a erodibilidade média dos solos da bacia ( $\text{t} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ ); LS é o fator adimensional topográfico (-); C é o fator médio de uso e manejo do solo da bacia (-) e P é o fator de práticas conservacionistas (-).

### 3.1.2.2. MUSLE

A MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) é uma modificação na USLE proposta por Williams (1975), onde a equação é utilizada para um evento, substituindo o fator de erosividade da chuva por um fator que representa a energia do escoamento nesse evento. A equação é dada abaixo:

$$Y = \left[ a(Q \cdot q_p)^b \right] \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

*Equação 2*

Onde Y é a produção de sedimentos em um evento (t); a e b são coeficientes adimensionais de ajuste (-); Q é o volume de escoamento superficial ( $\text{m}^3$ );  $q_p$  é a vazão de pico ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ); K é a erodibilidade média dos solos da bacia ( $\text{t} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ ); LS o fator adimensional topográfico (-); C é o fator médio de uso e manejo do solo da bacia (-) e P é o fator de práticas conservacionistas (-).

## 3.2. HIDROSSEDIMENTOLOGIA

Hidrossedimentologia é a ciência que busca a compreensão da interação entre processos hidrológicos e processos sedimentológicos (desagregação, transporte e deposição de sedimentos) na bacia hidrográfica, em diferentes escalas temporais e espaciais. (ZANANDREA, 2017).

### 3.2.1. SEDIMENTOS EM RIOS

O início do transporte de sedimentos ocorre nas encostas e se mantém até os cursos d'água, sendo depois propagados pelos canais de escoamento. A maior parte dos sedimentos é

transportada durante os eventos de chuva, podendo representar cerca de 70% a 90% de toda a quantidade transportada (CARVALHO, 2008; FAGUNDES, 2018). O transporte de sedimentos, que varia de acordo com as condições locais e do escoamento, é função de diversos aspectos relacionados tanto com a partícula, como o tamanho, o peso, forma, assim como velocidade da corrente, declividade do leito, forma do canal (CARVALHO, 2008)

De acordo com Subcommittee on Sedimentation (1963) há três meios distintos pelos quais as partículas sólidas se movimentam em um fluxo (Figura 2):

- Carga de arrasto: são aquelas que rolam ou escorregam ao longo do curso d'água;
- Carga saltante: são aquelas que pulam ao longo do curso d'água, devida aos efeitos da correnteza e colisões com outras partículas;
- Carga em suspensão: são aquelas transportadas pela coluna d'água, sendo sustentadas pela componente vertical da velocidade de fluxo turbulento.

O transporte de sedimentos é uma combinação dependente da carga de arrasto, da carga saltante e da carga em suspensão, partes essas que não podem ser consideradas com precisão separadamente, exceto no caso da carga de leito quando nenhum material se encontra em suspensão, devido ao fato de que os fenômenos não são suficientemente compreendidos para permitir tal análise (SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION, 1963). Por fim, a deposição é a parada total da partícula em suspensão recém decantada ou transportada por arraste (BORDAS & SEMMELMANN, 2001).

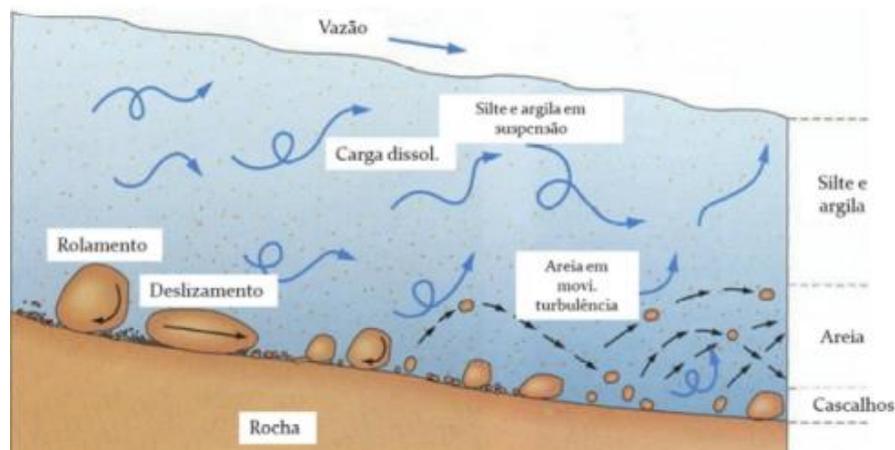


Figura 2 - Deslocamento das partículas no curso d'água. Fonte: (MARCONDES, 2011).

Segundo Carvalho (2008), a distribuição dos sedimentos ao longo do curso d'água em relação ao tempo, também deve ser considerada, sendo possível dividir o rio em três regiões na

dinâmica de sedimentos, figura 3. A região de cabeceira dos rios é onde se encontram os sedimentos com maiores tamanhos (pedras, cascalhos), sendo também a maior fonte geradora de sedimentos, sofrendo maior erosão e degradação. A região de transição, é onde ocorre em maior grau o transporte de sedimentos, por conta de alguns fatores como a diminuição das declividades, intensidade de chuvas e recebimento de sedimentos dos afluentes, em virtude disso, ao longo do percurso os sedimentos são fracionados e suas granulometrias se reduzem (CARVALHO, 2008). Por fim, a região de deposição, encontra-se a região de menor erosão, com uma forte deposição dos sedimentos nos colúvios e sua distribuição nos terrenos (CARVALHO, 2008).

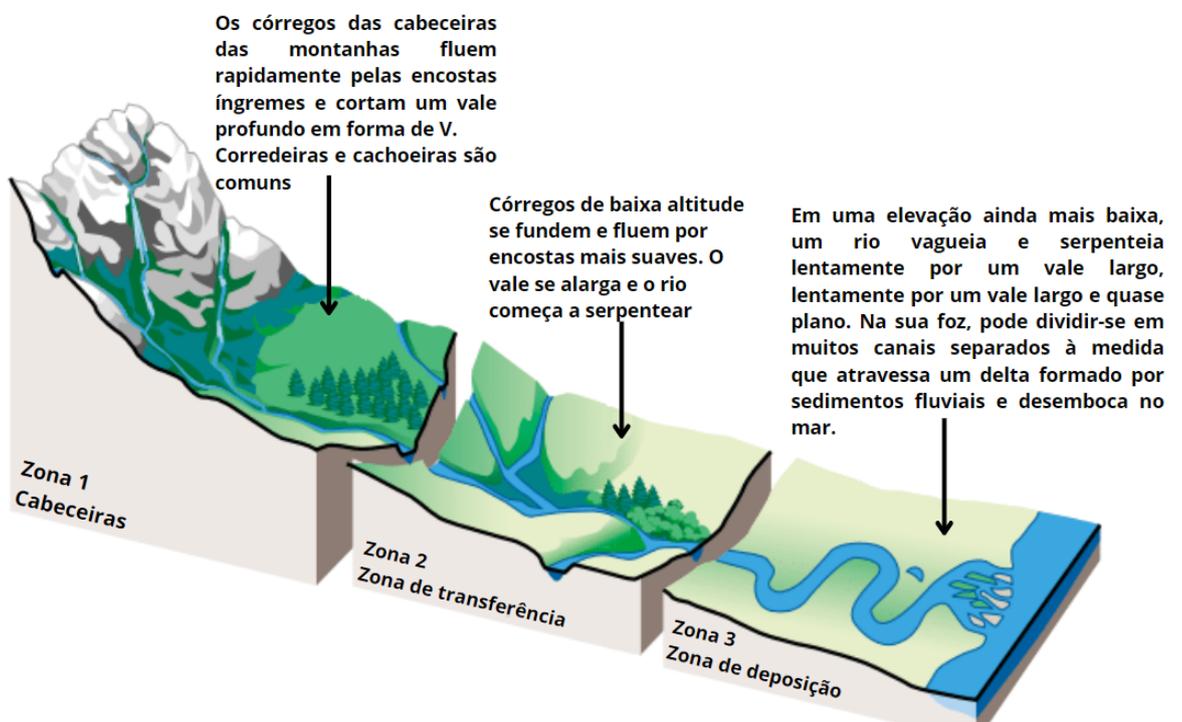


Figura 3 - Zonas de sedimentos em um rio. Fonte: (MILLER, 1990).

Existem diversas abordagens para a medição de produção de sedimentos em campo, a mais conhecida e utilizada no Brasil é a de carga de sedimentos, expressa pela descarga sólida em suspensão (unidade de massa por tempo) (FAGUNDES, 2018). A descarga sólida em suspensão em suspensão geralmente é calculada a partir dos dados de vazão e concentração de sedimentos em suspensão - CSS (DOS SANTOS et al., 2001; CARVALHO, 2008). Dados estes fornecidos pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) por meio da sua rede sedimentométrica (FAGUNDES, 2018).

### 3.3. MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA

Um modelo é uma representação esquemática simplificada do mundo real, que se destina a ajudar os engenheiros, cientistas e tomadores de decisão para determinar o que está acontecendo na realidade, e prever o que pode acontecer no futuro (POPESCU, 2014). Dessa forma, modelos hidrológicos são representações matemáticas do comportamento dos sistemas hídricos. Os modelos hidrológicos podem ser classificados de acordo com os conceitos físicos considerados no seu desenvolvimento e sua abrangência espacial (TUCCI, 1998). Segundo Almeida (2017) os modelos podem ser classificados em diferentes classes tendo como base alguns fatores do modelo.

Com base na solução:

- Determinísticos, aqueles modelos que produzem respostas idênticas para o mesmo conjunto de entradas, mesmo quando uma variável de entrada tiver caráter aleatório;
- Estocásticos, aqueles modelos quando uma ou mais variáveis envolvidas na modelagem têm um comportamento aleatório, possuindo distribuição de probabilidade.

Com base nos conceitos físicos:

- Empíricos, aqueles cuja formulação não possui nenhuma representação explícita dos processos físicos da bacia, podendo possuir uma característica regionalista;
- Conceituais, modelos conceituais são baseados nas equações que descrevem o processo físico conceitual ou hipotético, não sendo necessariamente baseado no processo real.

Com base na variabilidade espacial:

- Concentrados, aqueles onde a área da bacia é representada de forma única, isto é, homogênea, não sendo possível a distribuição das características físicas relacionadas ao solo, à vegetação e à chuva. No seu desenvolvimento são atribuídos valores médios representativos para toda a área de acordo com cada parâmetro do modelo;
- Distribuídos aqueles que permitem que toda a área seja dividida em unidades irregulares ou regulares, consideradas como homogêneas, reconhecendo desta forma a distribuição espacial das variáveis e dos parâmetros considerados. Este tipo de modelo permite a manipulação de dados de pluviometria levando em

consideração sua variabilidade espacial, sendo, portanto, mais representativa do que real.

Dentre os critérios de classificação dos modelos hidrológicos, também é utilizada a escala de aplicação, Collischonn (2001) propõe a classificação de grandes bacias, sendo estas as bacias hidrográficas com mais de 10.000 km<sup>2</sup>.

Os modelos utilizados na simulação de transporte de sedimentos se diferenciam principalmente por causa da complexidade, dos processos considerados, dos dados necessários para calibração, uso de cada modelo e pela dependência da resposta dos modelos hidrológicos (MERRIT ET. AL, 2003; SANTOS, 2009).

No presente trabalho o modelo MGB-SED foi adotado como objeto de estudo. Assim, nos próximos itens do capítulo ele é revisado.

### 3.3.1. O MODELO HIDROLÓGICO MGB

Modelo de Grandes Bacias (MGB), desenvolvido por Collischonn (2001), e desde então aprimorado e validado em diversos estudos como nos trabalhos realizados por Paiva (2009), Fan & Collischonn (2014), Pontes, et al. (2015), Fan (2015), Fleischmann, et al., (2017), Siqueira et al., (2017).

O MGB é um modelo hidrológico do tipo conceitual, distribuído, voltado para aplicações em grandes bacias, que simula processos hidrológicos na superfície terrestre, divididos em quatro módulos, figura 4: balanço hídrico no solo; balanço de energia e evapotranspiração; interceptação, geração e propagação de escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo nos elementos de discretização da bacia hidrográfica; e propagação de vazão na rede de drenagem. (BUARQUE, 2015; FAGUNDES, 2018). Informações mais detalhadas sobre o modelo podem ser encontradas em nas referências supracitadas.

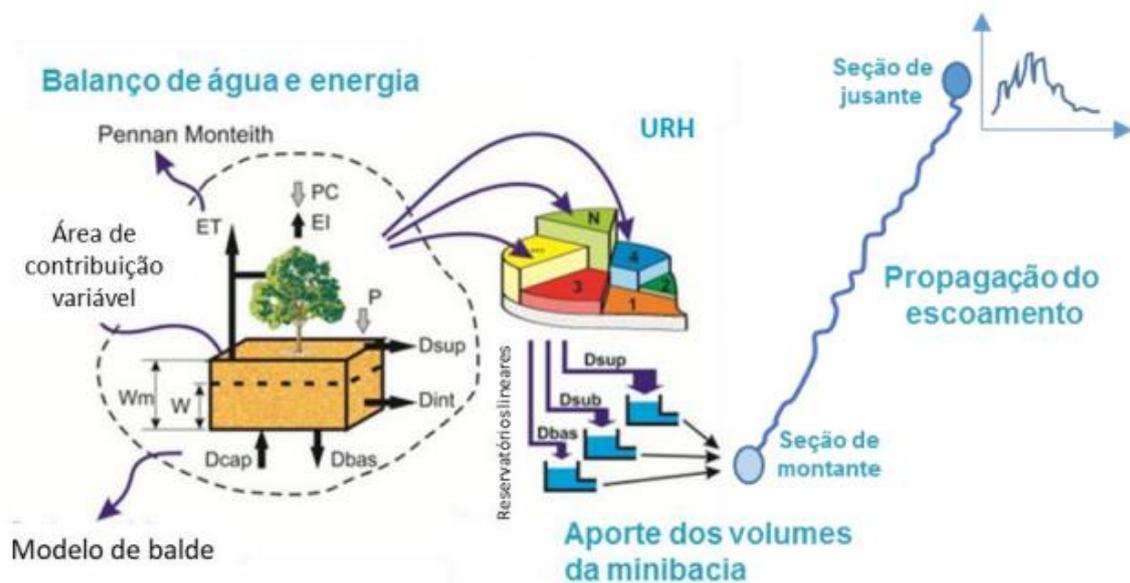


Figura 4 - Representação esquemática do modelo hidrológico MGB. Fonte: Fagundes (2018).

### 3.3.2. MODELO DE SEDIMENTOS MGB-SED

Desenvolvido por Buarque (2015), o modelo MGB-SED, é um módulo de sedimentos, acoplado ao modelo hidrológico MGB (COLLISCHONN, 2001), que apresenta a estimativa da geração de sedimentos na bacia e simulação do transporte de sedimentos em rios de forma integrada à simulação hidrológica e hidráulica em grandes bacias (> 10.000 km<sup>2</sup>).

Nos itens a seguir, são apresentados de forma resumida os processos matemáticos presentes nos três componentes (módulos) do modelo MGB-SED: bacia, rio e planície (BUARQUE, 2015). Informações mais detalhadas podem ser encontradas em Buarque (2015), Fagundes (2018) e Foeger (2022).

#### 3.3.2.1. MÓDULO BACIA

O cálculo da erosão do solo na bacia é realizado para cada Unidade de Resposta Hidrológica (URH) da minibacia utilizando a MUSLE (WILLIAMS, 1975), com os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  assumindo valores padrão de 11,8 e 0,56, respectivamente. Para sua aplicação são utilizadas informações diretamente do Modelo Digital de Elevação (MDE), o considerando informação matricial  $k < l, c >$  de  $l$  linhas e  $c$  colunas que armazena informação em cada  $l \times c$  posição (pixel) (BUARQUE, 2015).

$$SED_{i,j}^k = 11,8 \cdot (Dsup_{i,j}^k \cdot qpico_{i,j}^k \cdot Apm_{i,j}^k)^{0,56} \cdot K_j \cdot C_j \cdot P_j \cdot LS_{i,j}^k \cdot FG_j$$

Equação 3

Onde, SED é a carga de sedimentos resultante da erosão do solo em toneladas [t]; Dsup é o volume de escoamento superficial em milímetros em hectares [mm/ha]; qpico é a taxa de pico do escoamento superficial em metros cúbicos por segundo [m³/s]; Apm é a área do pixel em hectares [ha]; K é o fator de erodibilidade do solo [0,013.t.m².h/(m³.t.cm)]; C é o fator adimensional de cobertura e manejo do solo [-]; P é o fator adimensional de práticas conservacionistas [-]; LS é o fator adimensional topográfico [-]; FG é o fator adimensional que considera a existência de fragmentos grosseiros ou rochas [-]; i e j são índices que indicam a minibacia e a URH, respectivamente; k é o pixel ao qual a equação está sendo aplicada.

A taxa de pico do escoamento superficial, em cada pixel, é dada considerando um volume de escoamento uniforme diário e o volume de escoamento é fornecida pelo módulo hidrológico MGB (BUARQUE, 2015), como é apresentado a seguir.

$$qpico_{i,j}^k = \frac{Dsup_{i,j}^k \cdot A_{i,j}^k}{86,4}$$

*Equação 4*

Onde *qpico* é a taxa de pico do escoamento superficial em metros cúbicos por segundo [m³/s]; *Dsup* é o volume de escoamento superficial em milímetros em hectares [mm/ha] e *A* é a área de cada pixel em hectares.

Segundo Buarque (2015) o fator K da equação 6, é calculado a partir das informações de porcentagens de silte, areia, argila e matéria orgânica presentes no solo da bacia, sendo os valores dos fatores extraídos das equações 7, 8, 9 e 10, propostas por Williams (1995).

$$K_j = Fag_j \cdot Fcs_j \cdot Forg_j \cdot Fa_j$$

*Equação 5*

$$Fag_j = 0,2 + 0,3 \cdot \exp \left[ -0,256 \cdot SAN_j \cdot \left( 1 - \frac{SIL_j}{100} \right) \right]$$

*Equação 6*

$$Fcs_j = \left( \frac{SIL_j}{ARG_j + SIL_j} \right)^{0,3}$$

*Equação 7*

$$Forg_j = 1 - \frac{0,25 \cdot orgC_j}{orgC_j + \exp(3,72 - 2,95 \cdot orgC_j)}$$

*Equação 8*

$$Fa_j = 1 - \frac{0,7 \cdot \left(1 - \frac{SAN_j}{100}\right)}{\left(1 - \frac{SAN_j}{100}\right) + \exp \left[-5,51 + 22,9 \cdot \left(1 - \frac{SAN_j}{100}\right)\right]}$$

*Equação 9*

Onde  $K$  é o fator adimensional de erodibilidade do solo [-];  $Fag$  é o fator adimensional de areia grossa [-];  $Fcs$  é o fator adimensional de argila e silte [-];  $Forg$  é o fator adimensional de carbono orgânico [-];  $Fa$  é o fator adimensional de areia [-]; e  $j$  é o índice que indica a URH [-],  $SAN$ ,  $SIL$ ,  $ARG$  e  $orgC$  são as porcentagens de, respectivamente, areia, silte, argila e carbono orgânico [%] presentes na camada superior do solo da URH  $j$ .

O fator C de cobertura e uso do solo é o fator da USLE (WISCHMEIER & SMITH, 1978) e está relacionado com o uso da terra, sendo um fator de redução da vulnerabilidade do solo a erosão de acordo com a sua cobertura e uso, seu valor varia entre 0 a 1, segundo Carvalho (2008), o fator C não possui um valor único, ele pode variar de 1,0 (áreas sem nenhuma vegetação) até 0,0001 (áreas de florestas virgens).

O fator P de práticas conservacionistas representa a diferença entre a perda de solo de um local no qual há o manejo do solo quantos às práticas que visem proteger o solo e uma área sem práticas como o cultivo morro abaixo (PANDEY et al., 2007). Tal como o fator C, seus valores variam entre 0 a 1 (BESKOW, et al., 2009), sendo plantio morro abaixo ou não há praticas conservacionistas apresentam o valor igual a 1,0, plantio em contorno é 0,5, alternância de capinas em conjunto com plantio de contorno é igual a 0,4, cordões de vegetação permanente apresenta o valor 0,2 e terraço apresenta o valor 0,1 (CARVALHO, 2008).

O fator LS é a combinação dos fatores comprimento da rampa L e declividade S e representam a contribuição do escoamento superficial no processo de erosão hídrica (FAGUNDES, 2018). Como apresentado em Buarque (2015), no modelo MGB-SED, foram acopladas equações para determinação automática do fator LS.

O fator de fragmentos grosseiros (FG) considera a existência de rochas na camada superior do solo, que sejam significativas para afetar a erosão no local (BUARQUE, 2015).

$$FG = \exp(-0,053 \cdot frocha)$$

*Equação 10*

Onde FG é o fator adimensional de fragmentos grosseiros [-] e  $frocha$  é a porcentagem de rocha na camada superior do solo [%].

A carga total de sedimentos gerada em cada URH de uma minibacia, corresponde ao somatório das cargas dos pixels dessa URH, porém, em grandes bacias nem todo o volume de sedimentos que chega à rede de drenagem o faz no mesmo passo de tempo, pois sofre retardo junto com o escoamento superficial (BUARQUE, 2015). Para representar esse retardo, foi utilizada a mesma abordagem do escoamento superficial, onde o aporte de sedimentos se dá pela passagem por um reservatório linear simples. (FAGUNDES, 2018).

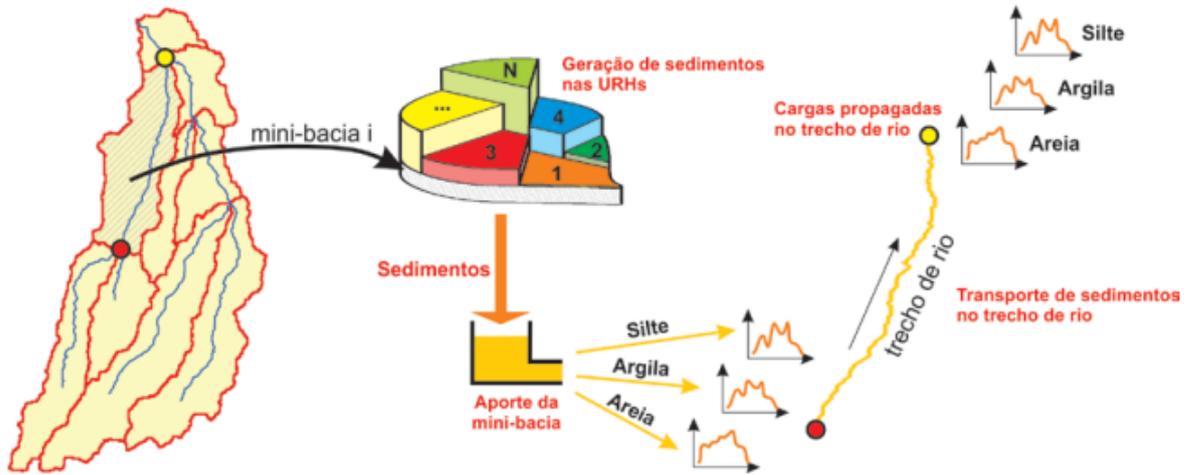


Figura 5 - Esquema dos processos de geração e propagação de sedimentos das minibacias e propagação de sedimentos na rede de drenagem. Fonte: Buarque (2015).

Por fim, o volume total de sedimentos gerados ( $VSED$ ) em cada URH de cada minibacia e armazenado no reservatório é computado pela Equação 13 e a descarga sólida em suspensão total ( $QS$ ) de saída do reservatório linear é computada como uma função linear, Equação 14, da respectiva carga armazenada e do tempo de retardo do reservatório superficial (BUARQUE, 2015). Representando a quantidade de sedimentos que está sendo liberada para a rede de drenagem.

$$VSED_{i,j}^t = VSED_{i,j}^{t-1} + \sum_{k=1}^{NPj} SED_{i,j}^k$$

Equação 11

$$QS_{i,j}^t = \frac{1}{TKS_i} \cdot VSED_{i,j}^t$$

Equação 12

Onde  $VSED$  é o volume no reservatório de sedimentos da URH em toneladas [t];  $SED$  é a carga de sedimentos resultante da erosão do solo em toneladas [t];  $NP$  é o número de pixels da URH [-];  $i$  e  $j$  são índices que indicam a minibacia e a URH, respectivamente [-] e  $k$  é o pixel

respectivo da equação [-];  $t$  e  $t-1$  indicam os passos de tempo atual e anterior, respectivamente em segundos [s];  $QS$  é a descarga sólida em suspensão total de saída do reservatório linear em toneladas por segundo [t/s] e  $TKS$  é o tempo de retardo do reservatório superficial em segundos [s].

### 3.3.2.2. MÓDULO RIO

O processo de transporte das partículas finas (silte e argila) é realizado por um modelo não permanente que considera que a velocidade do escoamento e os processos advectivos são dominantes (FAGUNDES, 2018), equação 15.

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial AUC}{\partial x} = q_{sm} - q_{sfl}$$

*Equação 13*

Onde  $A$  é a área molhada da seção em metros quadrados [m<sup>2</sup>];  $C$  é a concentração média de sedimentos em toneladas por metro cúbico [t/m<sup>3</sup>];  $U$  é a velocidade média do escoamento na seção em m/s [m/s];  $x$  é a distância na direção do escoamento em metros [m];  $t$  é o tempo em segundos [s];  $q_{sm}$  é a contribuição lateral de sedimentos em cada minibacia em toneladas por metro por segundo [t/m.s] e  $q_{sfl}$  é a descarga de troca de sedimentos entre o rio e a planície de inundação por unidade de comprimento em toneladas por metro por segundo [t/m.s].

O termo da descarga de troca de sedimentos entre o rio e a planície de inundação por unidade de comprimento ( $q_{sfl}$ ) é considerado diferente de zero apenas nos trechos com propagação de vazões pelo modelo hidrodinâmico (PAIVA, 2009), ou seja, quando a propagação é dada pelo modelo original de Muskingum-Cunge (COLLISCHONN, 2001) esse parâmetro é igual a zero.

A equação 15 é, segundo Fagundes (2018) resolvida numericamente, para cada classe de partícula em suspensão, através de um esquema explícito regressivo no tempo e no espaço, aplicado trecho a trecho, de montante para jusante, pela equação 16 a seguir:

$$C_i^t = \frac{\theta \cdot Q_{i-1}^t \cdot C_{i-1}^t - (1 - \theta) \cdot (Q_i^{t-1} \cdot C_i^{t-1} - Q_{i-1}^{t-1} \cdot C_{i-1}^{t-1})}{\frac{Vol^t}{\Delta t} + \theta \cdot Q_i^t} + \frac{\frac{Vol^{t-1}}{\Delta t} \cdot C_i^{t-1} + QS_m^t - QS_{fl}^t}{\frac{Vol^t}{\Delta t} + \theta \cdot Q_i^t}$$

*Equação 14*

Onde  $C$  é a concentração média de sedimentos do rio a jusante no final do intervalo de tempo em toneladas por metro cúbico [t/m<sup>3</sup>];  $Q$  é a vazão líquida em metros cúbicos por segundo [m<sup>3</sup>/s];  $\theta$  é o ponderador dos termos temporais, sendo 0 ou 1 [0-1];  $Vol$  é o volume médio da

água no trecho em metros cúbicos [ $m^3$ ];  $t$  e  $t-1$  indicam os passos de tempo atual e anterior, respectivamente em segundos [s];  $QSm$  é a descarga sólida em suspensão em toneladas por segundo (silte ou argila) proveniente da minibacia associada ao trecho de rio [t/s] e  $QSfl$  é a descarga sólida em suspensão em toneladas por segundo entre o rio e a planície de inundação [t/s].

Foeger (2022), propôs modificações no modo de propagação do MGB-SED. Utilizando o método inercial em vez do método de propagação combinado, que utiliza o método de Muskingum-Cunge e as equações de Saint-Venant. O presente trabalho utiliza a versão do modelo MGB-SED, com método de propagação proposto por Buarque (2015), ou seja, o combinado das equações de Saint-Venant e o método de Muskingum-Cunge.

#### 3.3.2.3. *MÓDULO PLANÍCIE*

Segundo Buarque (2015), nos trechos de rios onde é adotado o método hidrodinâmico de propagação de vazões incorporado ao MGB por Paiva et al. (2009), o modelo de sedimentos permite a troca de cargas em suspensão entre os rios e as planícies de inundação. O modelo assume uma mistura completa de sedimentos nas planícies, de forma que as concentrações são constantes na vertical para cada classe de partícula.

#### 4. METODOLOGIA

Os materiais e métodos utilizados nesse trabalho serão apresentados de acordo com a sua realização. De modo geral, a proposta metodológica tem em vista o aprimoramento dos resultados do modelo hidrossedimentológico, MGB-SED, para representar movimentos de massa.

De especial interesse à metodologia deste trabalho está a utilização do modelo hidrológico MGB (COLLISCHONN, 2001) e do modelo de sedimentos MGB-SED (BUARQUE, 2015). A proposta de metodologia visa contribuir para o aprimoramento do modelo de sedimentos, afim de melhorar seus resultados para regiões com ocorrência de movimentos de massa.

A metodologia de estudo utilizada neste trabalho se encontra descrita em tópicos de acordo com as atividades realizadas para atendimento aos objetivos estabelecidos da etapa de apresentação, sendo resumida na figura 6. Na primeira etapa se encontra o detalhamento do processo de aquisição de dados necessários a todas as etapas de modelagem do trabalho e a caracterização da área de estudo. A seguir, há a preparação, calibração e validação do modelo hidrológico, descrevendo, de forma reproduzível, todo o processo de pré-processamento de dados, calibração e validação do modelo hidrológico MGB. A terceira etapa ocorre um processo semelhante, desta vez com o modelo de sedimentos, a preparação e pré-processamento, definição dos parâmetros iniciais da equação MUSLE, a calibração e validação do modelo. A quarta e última etapa é a inserção de gatilhos e multiplicador nas rotinas do modelo de sedimentos, afim de representar a ocorrência de movimentos de massa na bacia, realizando simulações com variações desses fatores inseridos.

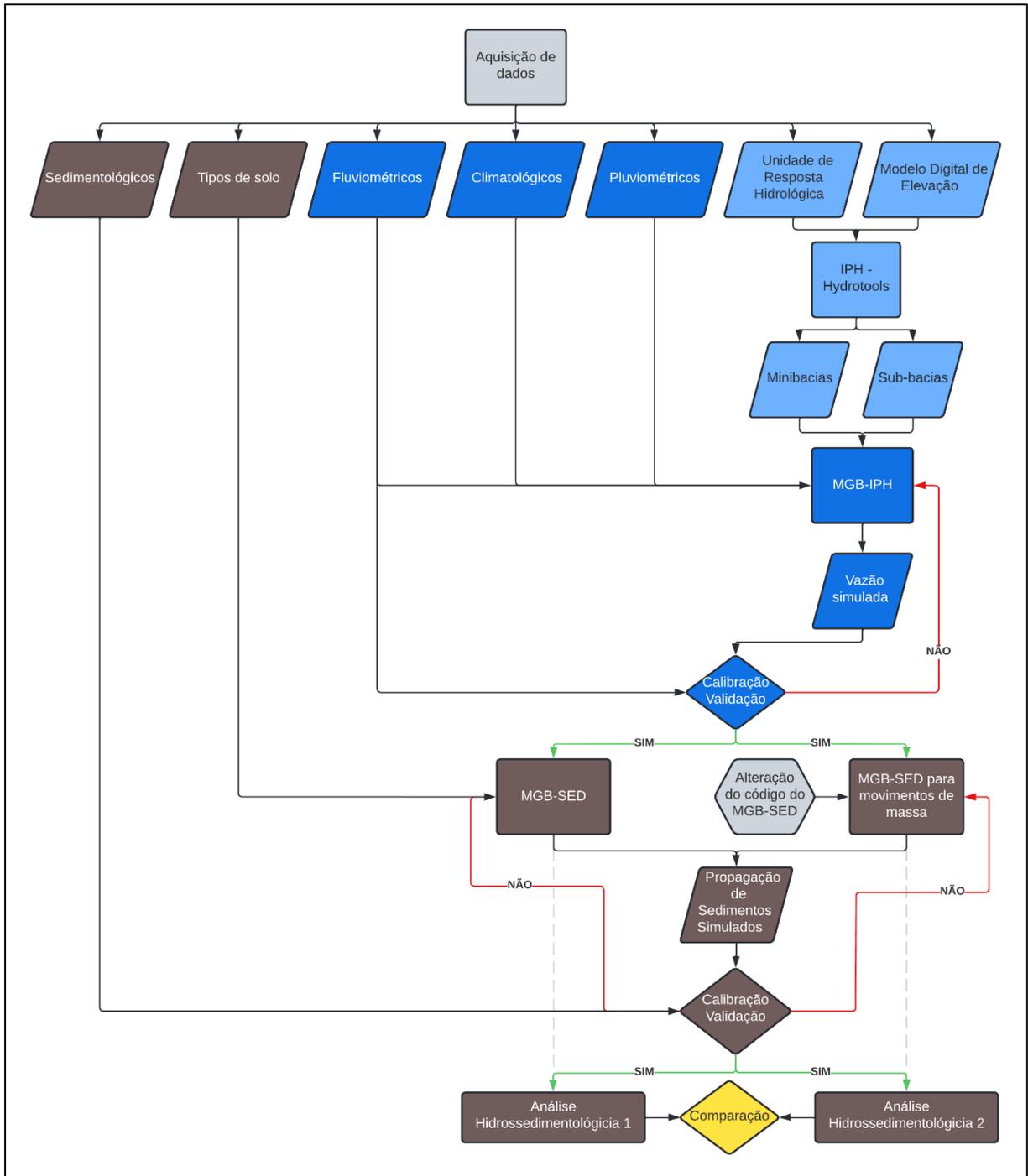


Figura 6 - Fluxograma da metodologia utilizada no estudo.

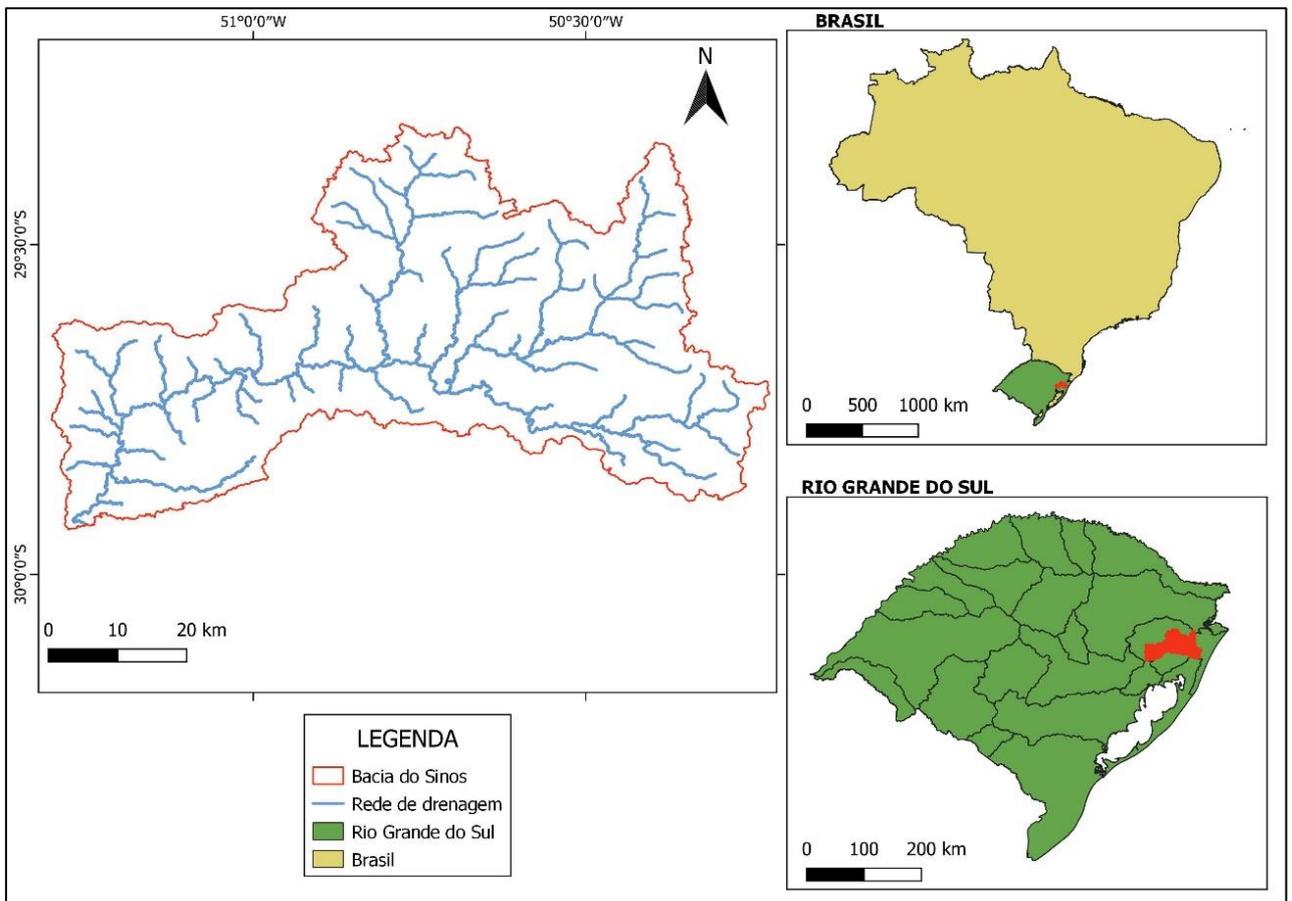
## 4.1. ÁREA DE ESTUDO

### 4.1.1. CARACTERIZAÇÃO DA BACIA

O MGB-SED foi aplicado na bacia do rio dos Sinos, uma bacia hidrográfica do estado do Rio Grande do Sul, localizada na região Leste do estado (figura 7) e formada por trinta municípios, sendo de grande importância por estar inserida na região metropolitana de Porto

Alegre, sendo assim uma bacia que possui grande população em sua área e representar 21% do PIB do estado (COMITESINOS, 2014).

O rio dos Sinos, que dá nome a bacia, nasce na região de morros no município de Caraá, acima de 800 metros de altitude e sua foz é no Delta do Jacuí, percorrendo em torno de 190 km (SEMA, 2020), na região de cabeceiras da bacia, locais com maiores declividades existem municípios que registraram ocorrência de movimentos de massa, tal como, o município de Rolante em 2017 (COSTA, 2020), localizado na região nordeste da bacia do Sinos.



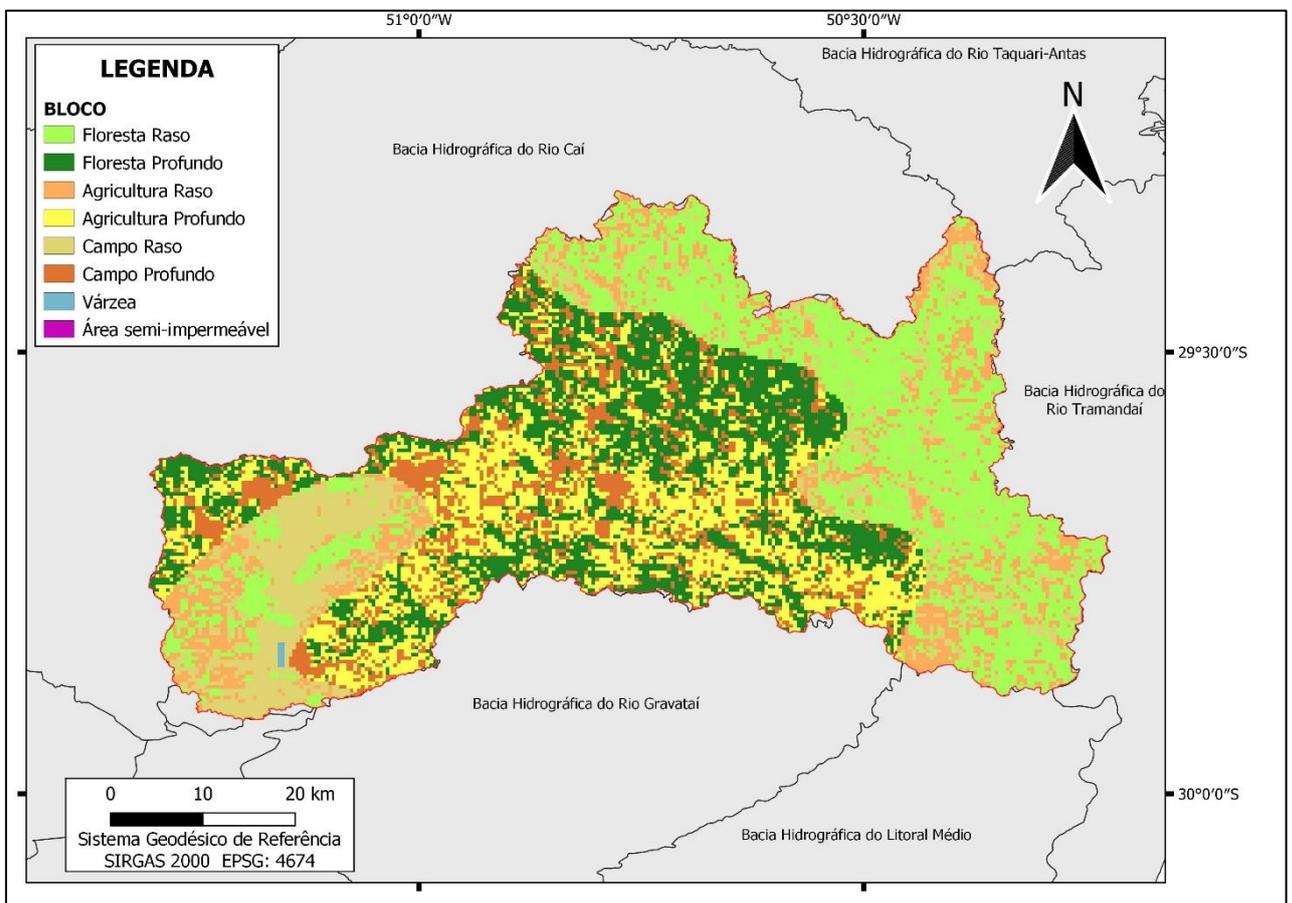
*Figura 7 - Localização da bacia do Sinos.*

O Modelo Digital de Elevação (MDE) foi obtido através dos dados gerados a partir do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução espacial de 30 metros. Os dados, são disponibilizados em torno do globo terrestre em grades quadradas divididas a cada um grau decimal.

Dados relativos aos tipos e usos do solo foram necessários e utilizados tanto no modelo hidrológico como no modelo de sedimentos. Para o modelo hidrológico é necessário espacializar as Unidades de Resposta Hidrológicas, URH, que são áreas que representam

regiões que teoricamente apresentam o mesmo comportamento hidrológico, influenciando assim diretamente os processos hidrológicos simulados pelo modelo.

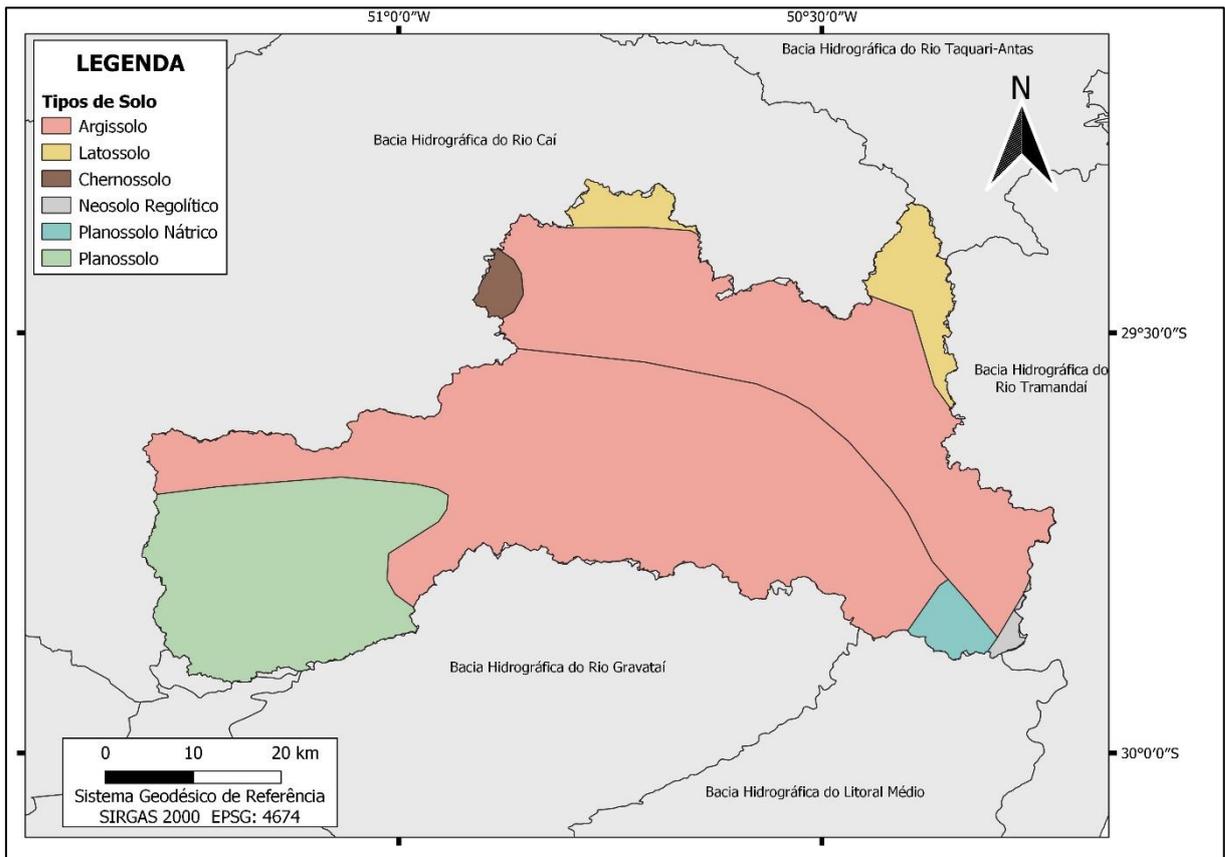
Para a realização do trabalho foi utilizado um mapa de Unidades de Resposta Hidrológicas (URH) desenvolvido por Fan *et al.* (2015), para toda a América Latina, com resolução espacial de 400 metros que apresenta bons resultados associados ao modelo hidrológico MGB. O mapa foi elaborado com base em mapas de tipos de solo da FAO (FAO, 2007), do projeto RADAM BRASIL, e outros produtos mais detalhados de alguns estados brasileiros (FAN *et al.*, 2015). A Figura 8 apresenta as URH's extraídas para a região da bacia a partir do mapa.



*Figura 8 - Mapa das Unidade de Resposta Hidrológica para a bacia do Sinos.*

Para o modelo de sedimentos é necessário conhecer as frações de areia, argila, e silte que serão consideradas na simulação de sedimentos. Para isto, foi utilizado o mapa de tipos de solo da FAO (FAO, 2007), cujo produto disponibilizado apresenta estimativas das frações de silte, argila e areia, para cada tipo de solo, além de outros dados como a porcentagem de carbono orgânico também necessária na simulação do modelo, é importante ressaltar que este mapa foi desenvolvido a nível mundial, com uma escala de 1:5000000, dessa forma, podem ocorrer erros

numa análise de menor ordem. A Figura 9 apresenta os tipos de solo FAO extraídos para a região da bacia de acordo com as associações aproximadas aos tipos de solo da EMBRAPA (EMBRAPA, 2006). Essas associações serão necessárias para realizar estimativas referentes as frações de silte, argila e areia para cada URH da bacia e o processo será explicado em maiores detalhes no item 3.3.3 de preparação e calibração do modelo de sedimentos. Como comentado anteriormente, por conta da escala do mapa, é apresentada a presença de latossolos nas regiões mais altas da bacia, fato que não deve ser observado.



*Figura 9 - Mapa de tipos de solos da FAO com às classes de solo da EMBRAPA.*

Para a realização das simulações do modelo hidrológico foi necessário obter levantamentos de clima e chuva que representam os dados de entrada do modelo MGB. Os dados foram obtidos com discretização diária, do sistema Hidroweb (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb>), mantido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Ambiental (ANA), por meio de uma ferramenta interna do próprio modelo, *ANA data acquisition*, que acessa diretamente o servidor interno da agência e faz o download dos dados em formato coluna (dia, mês, ano, medição). Foram utilizados dados de precipitação de estações com até trinta quilômetros da bacia, para assim, representar da melhor forma possível a heterogeneidade da precipitação da região. Uma grande quantidade de dados foi baixada através

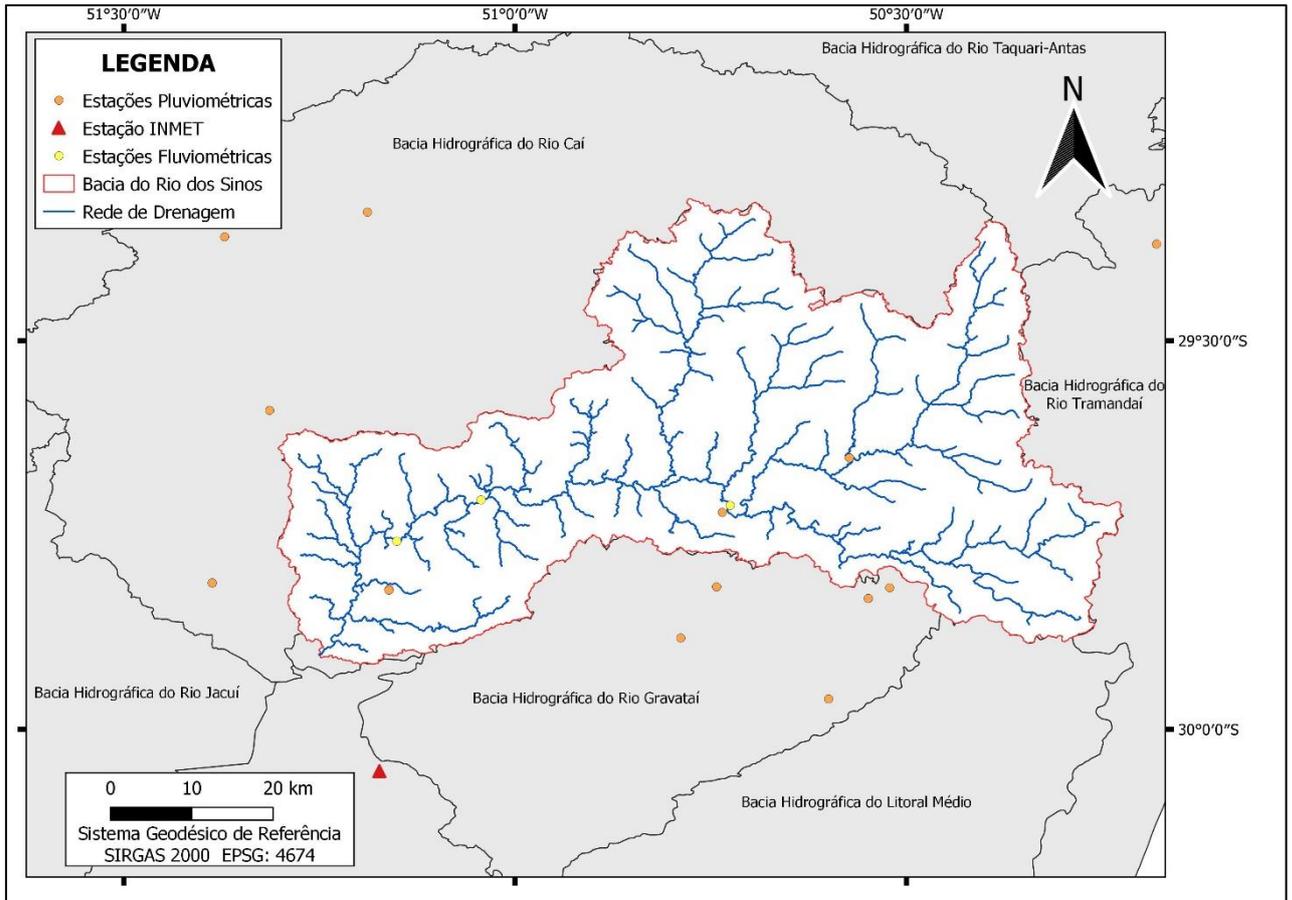
da ferramenta e posteriormente os dados foram analisados quanto a sua disponibilidade temporal através da ferramenta Super Manejo de Dados (COELHO & FAN, 2016), levando-se, para a simulação, somente aqueles que apresentavam disponibilidade de dados maior do que 1% em um longo período, para que assim fossem excluídos os postos pluviométricos que não apresentam registro algum de medições no banco de dados da ANA.

Para representação da acurácia, calibração e validação dos modelos simulados, hidrológico e de sedimento, são necessários dados medidos de vazão e concentração de sedimentos em suspensão para que sejam realizadas comparações entre as simulações e os dados medidos. Os dados medidos de vazão foram obtidos da mesma maneira que os dados de chuva, através da ferramenta de aquisição de dados do modelo, os quais também foram analisados através da ferramenta Super Manejo de Dados. Após a análise foram separados para calibração e validação do modelo 3 postos fluviométricos que apresentavam melhor distribuição espacial na bacia, representatividade dos principais rios da bacia, variações da área de drenagem à montante, sem falhas extensas em um longo período de tempo. Os dados de sedimentos são mais escassos em relação aos pluviométricos e de vazão, sendo também obtidos via sistema Hidroweb porém diretamente no site. Os dados de sedimentos são medidos em campo no formato de campanhas, para a região de estudo apenas 2 postos fluviométricos possuíam dados de concentração de sedimentos medidos com longo período de medições.

A tabela 1 apresenta as estações pluviométricas, fluviométricas e de sedimentos escolhidas na bacia e a Figura 10 apresenta a distribuição espacial destas estações.

*Tabela 1 - Estações pluviométricas e de sedimentos selecionas no estudo.*

Código	Nome	Lat	Long
87374000	Taquara Montante	-29.720	-50.734
87380000	Campo Bom	-29.692	-51.046
87382000	São Leopoldo	29.759	-51.148



*Figura 10 - Mapa das estações utilizadas na modelagem.*

## 4.2. MGB

Para realizar a simulação o modelo hidrológico MGB precisa passar por algumas etapas, sendo inicialmente necessário passar pela etapa de pré-processamento para definir as características espaciais e físicas da bacia estudada, a etapa seguinte passa pela definição e aquisição dos dados hidrológicos e climatológicos a serem utilizados nas etapas finais de calibração e validação dos dados simulados. O processo será apresentado de forma mais detalhada nos itens a seguir.

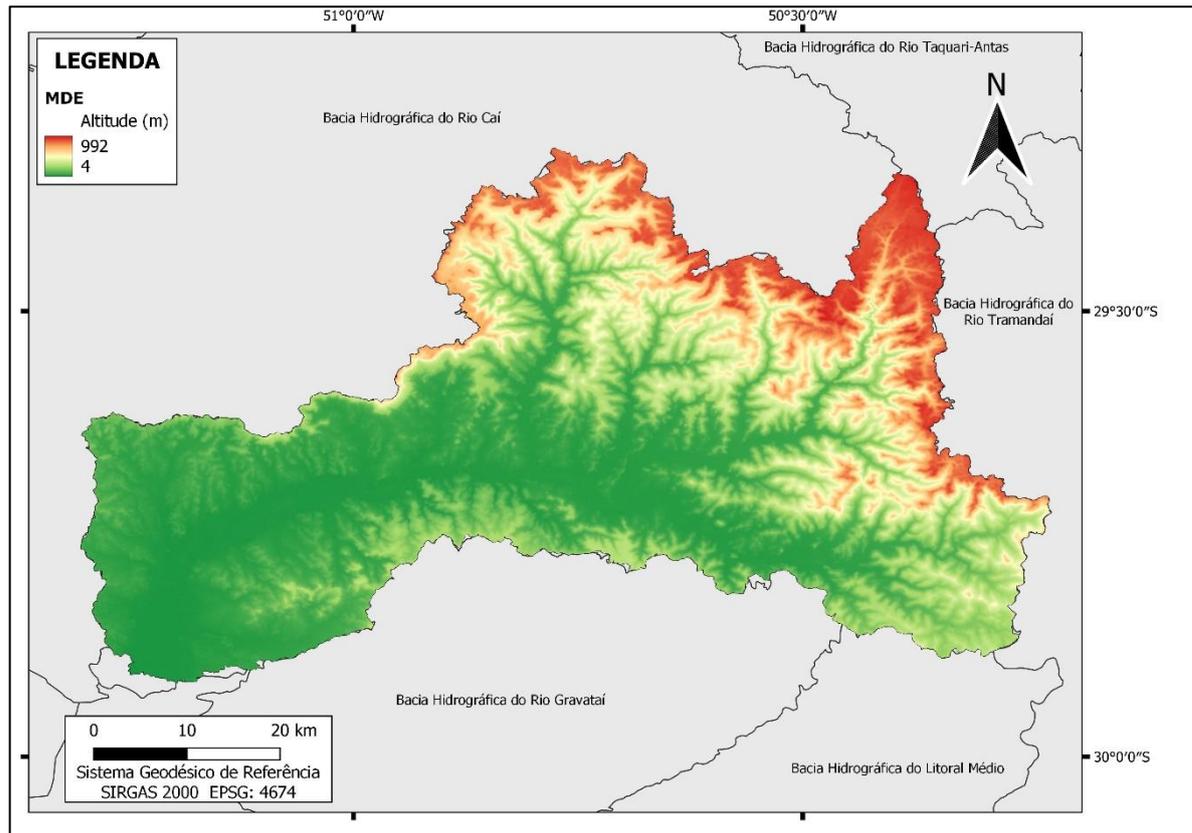
### 4.2.1. PRÉ-PROCESSAMENTO

Convertendo o MDE, adquirido anteriormente, para o formato ASCII é necessário o uso das ferramentas disponíveis no IPH-Hydrotools (SIQUEIRA et al., 2016) para serem removidas as depressões do MDE, via método Modified Heuristic Search (MHS), com o MDE corrigido são geradas as direções de fluxo (Flow Direction), direções de fluxo acumuladas (Flow Accumulation).

O próximo passo é gerar as redes de drenagem, para tanto, é necessário um limiar da área de drenagem (km<sup>2</sup>), contagem ou porcentagem de células, das quais a partir desse valor

será gerado escomento, quanto menor o limiar definido, mais detalhada e densa é a rede de drenagem, para o estudo em questão, foi definido um limiar de área de 5 km<sup>2</sup>, gerando assim uma rede dealhada o suficiente para definir os principais rios e afluentes da bacia.

A seguir são apresentados os mapas resultantes da correção do MDE (figura 11), direções de fluxo (figura 12), direções de fluxo acumulada (figura 13) e a rede de drenagem (figura 14) para a bacia do rio dos Sinos.



*Figura 11 - Elevação da bacia do Sinos.*

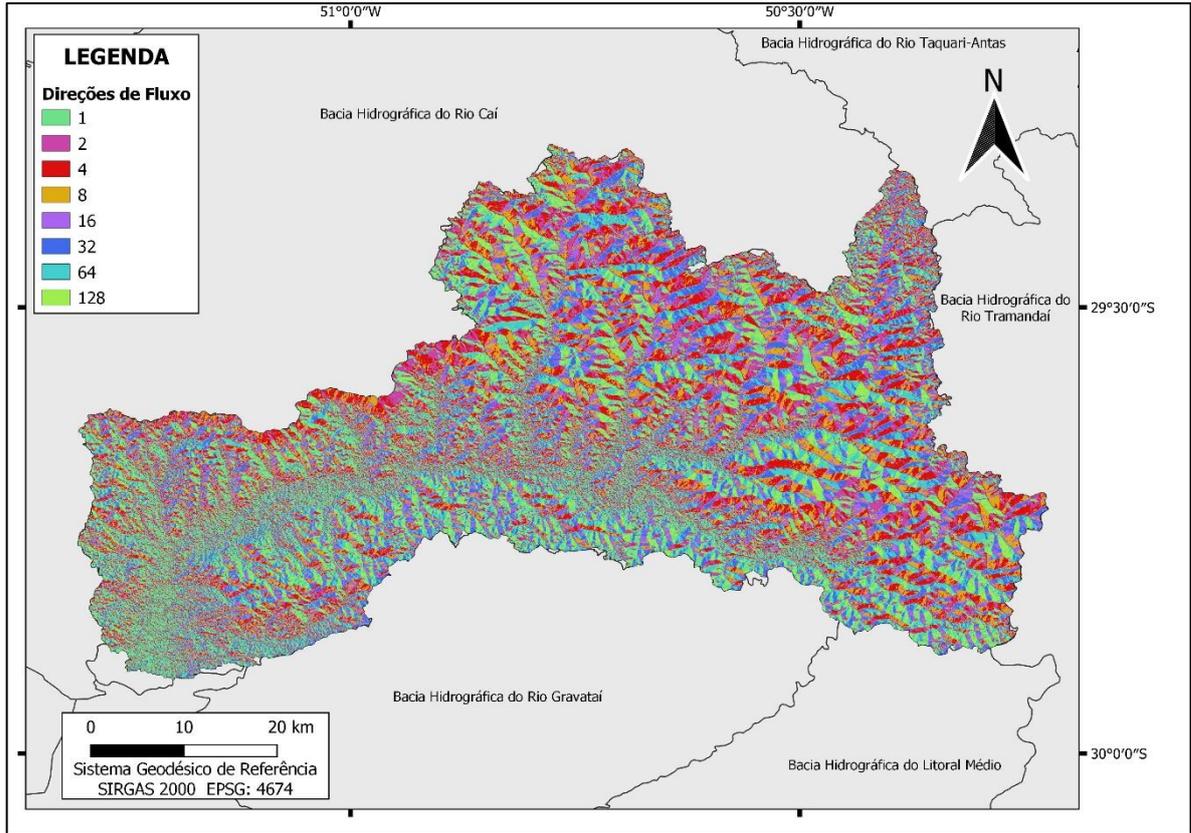


Figura 12 - Mapa com o resultado do processamento para as direções de fluxo da bacia.

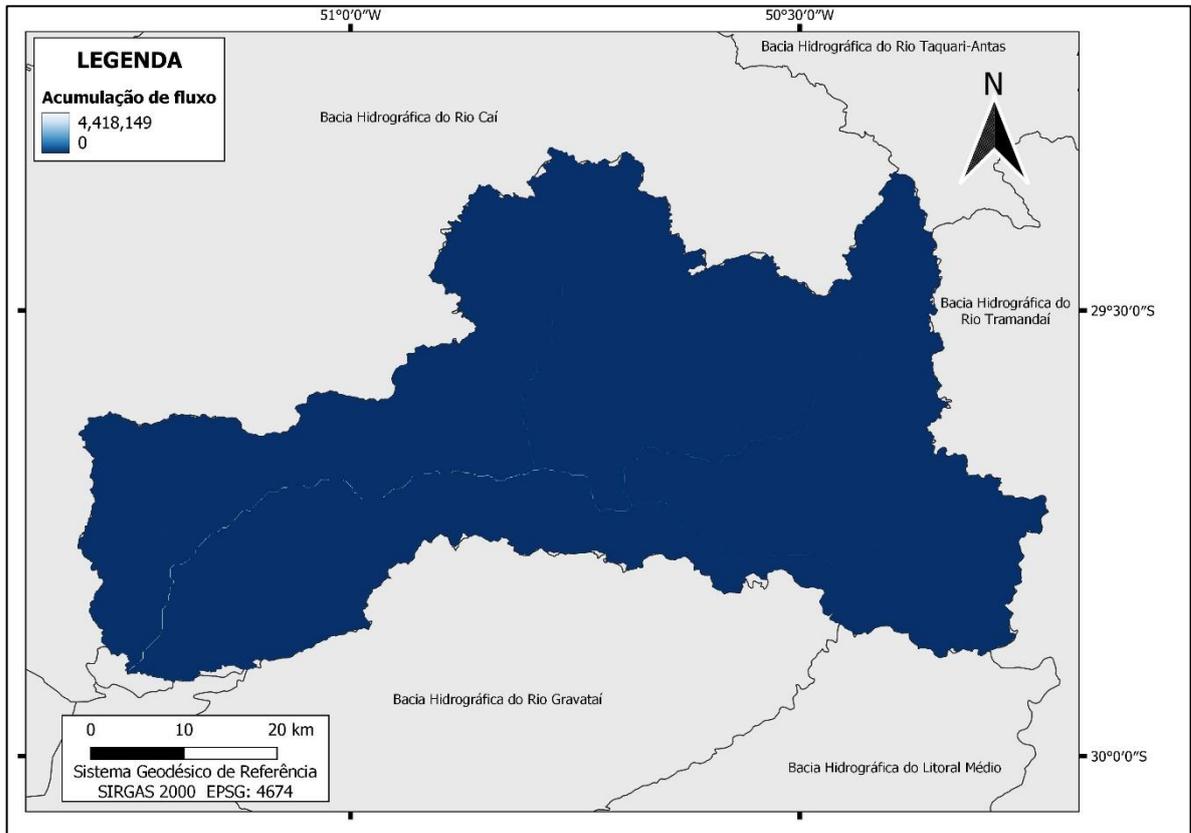
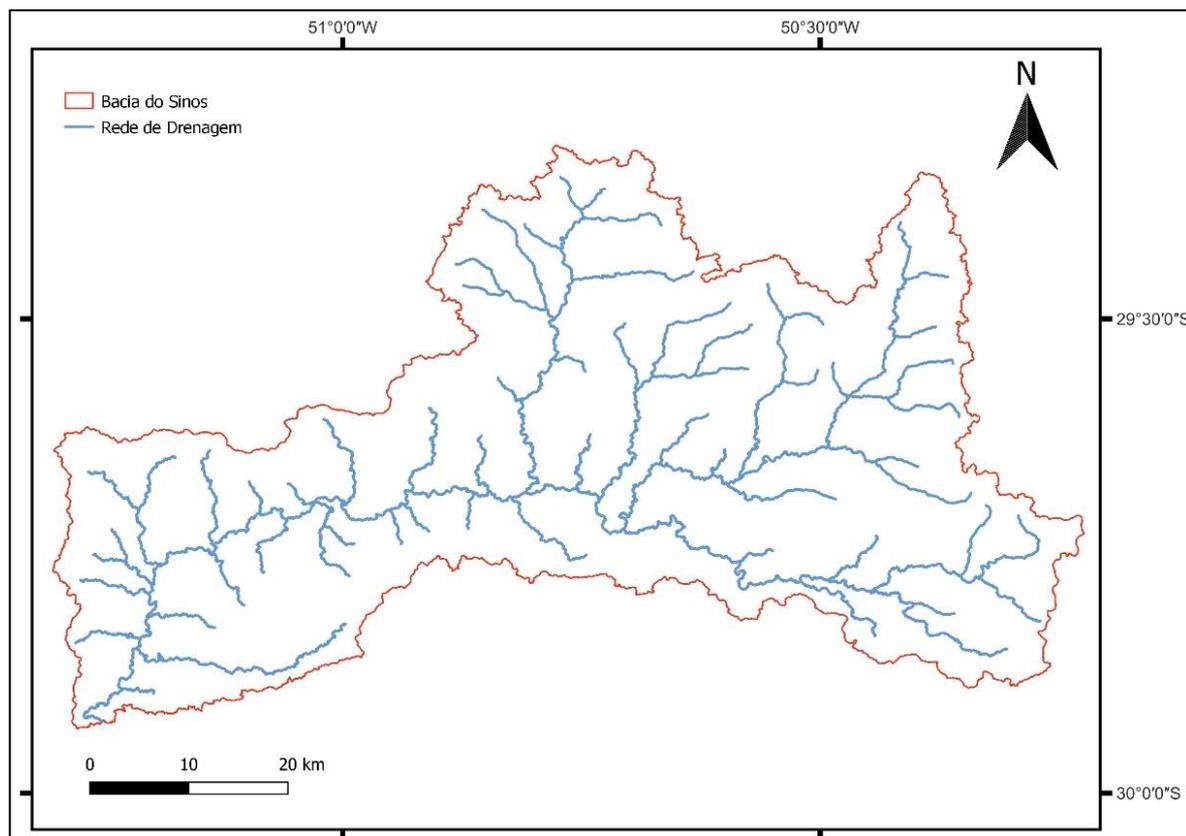


Figura 13 - Mapa com o resultado do processamento para as direções de fluxo acumulada da bacia.



*Figura 14 - Rede de drenagem sintética para a bacia do Sinos.*

As últimas etapas do pré-processamento são a definição da minibacias e, se necessário, a definição das sub-bacias, na primeira etapa a rede de drenagem é segmentada em todos os seus trechos de rios com o uso da ferramenta Stream Segmentation. A partir da segmentação da rede são discretizadas as áreas de contribuição de cada trecho de rio na bacia (minibacias), como a bacia do rio dos Sinos possui características diversas em sua extensão, sejam geomorfológicas ou pedológicas, foram geradas sub-bacias, em função da simularidade com as Unidades de Respostas Hidrológicas (URH) e locais com estações fluviométricas, afim de facilitar a calibração e validação do modelo. Ao final da discretização foram definidas 276 minibaicas e 6 sub-bacias, as figuras 15 e 16 apresentam as minibacias e sub-bacias, respectivamente.

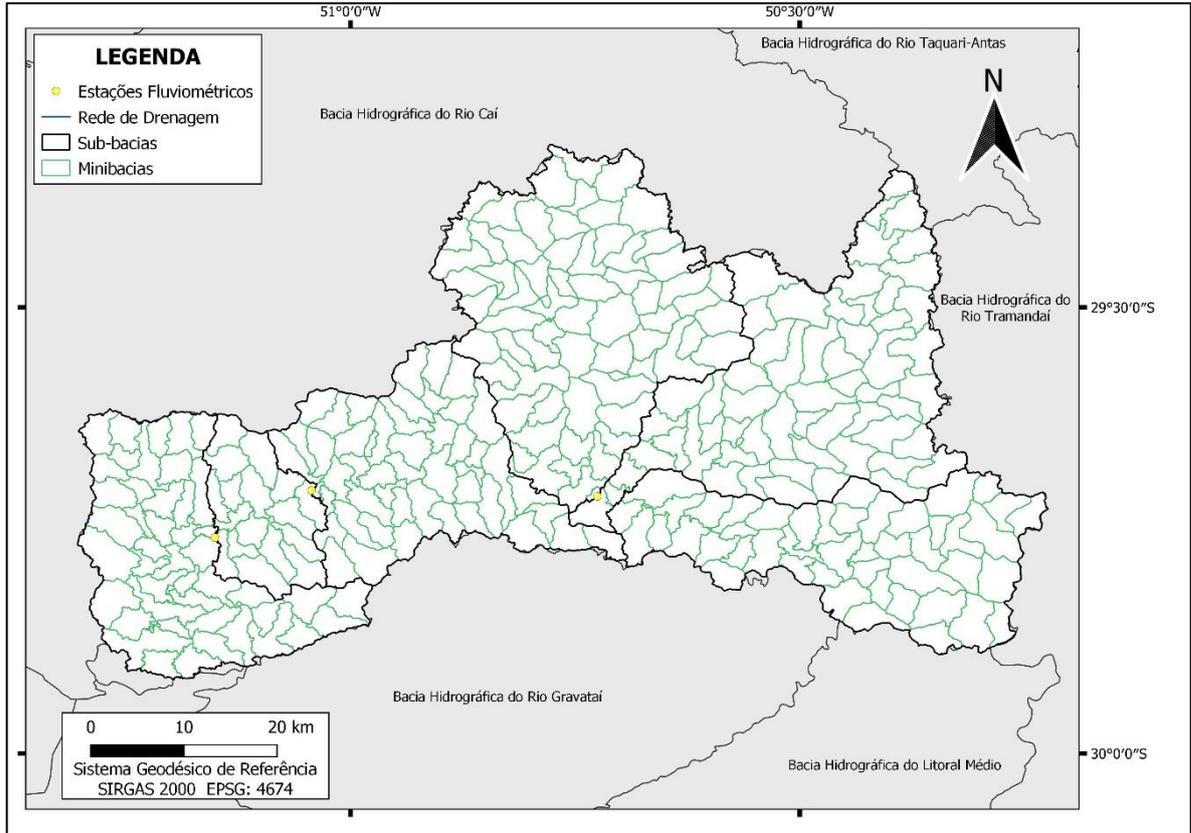


Figura 15 - Mapa das 276 minibacias geradas para a bacia do Rio dos Sinos.

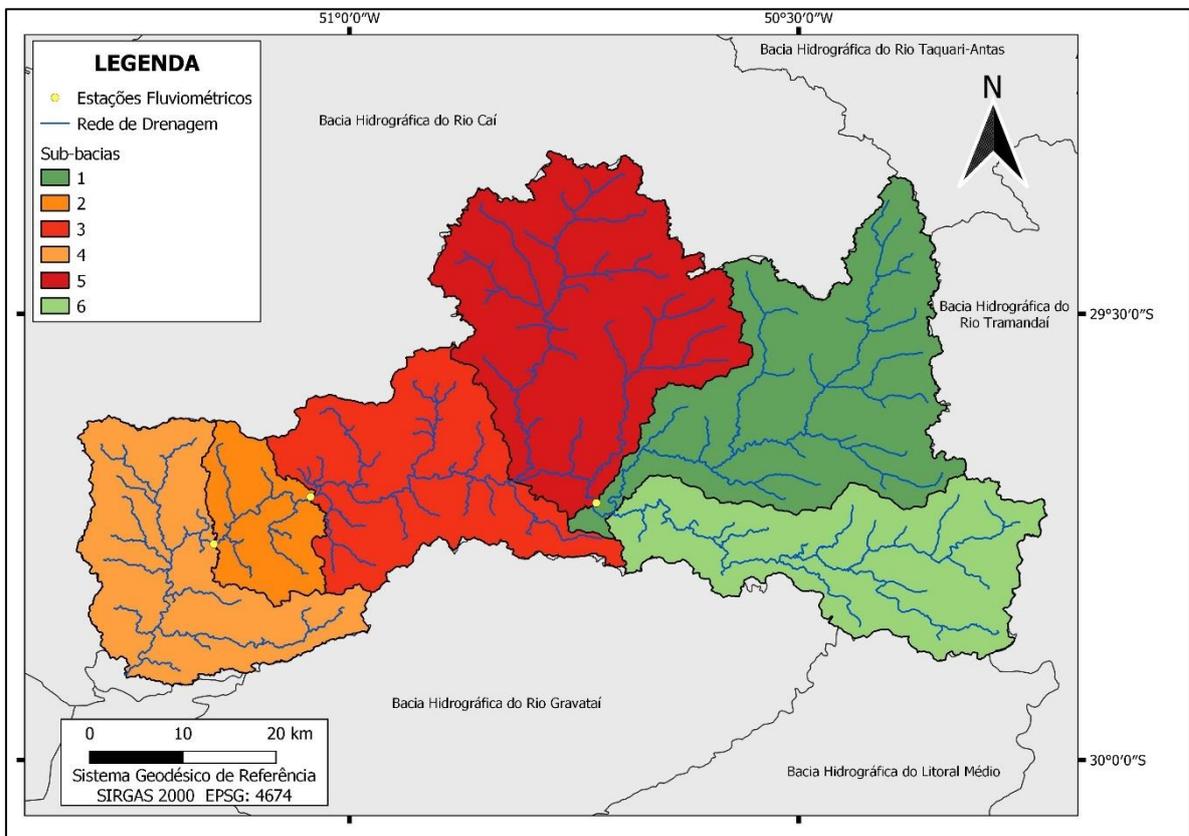


Figura 16 - Mapa das 6 sub-bacias geradas para a bacia do Rio dos Sinos.

#### 4.2.2. DADOS HIDROLÓGICOS E METEOROLÓGICOS

Realizado o pré-processamento da bacia foi realizada a aquisição dos dados hidrológicos e meteorológicos da bacia e, com os períodos de dados existentes foram definidos os períodos de calibração e validação do modelo. A aquisição de dados utilizou a ferramenta *Ana Data Acquisition* selecionando os postos fluviométricos com dados de vazões diárias presentes na bacia e, postos pluviométricos num raio de 20 km da bacia do rio dos Sinos, com a falta de estações com dados o raio foi aumentado para 30 km.

A partir da disponibilidade de dados fluviométricos foram definidos os períodos de calibração e validação do modelo, tabela 2. Com os períodos definidos foi realizada a interpolação dos dados pluviométricos, utilizando o método do inverso da distância ao quadrado, a partir da ferramenta interna do modelo (*Interpolate Precipitation*) e espacializando os dados em escala de minibacia. Os dados de vazões foram separados nos períodos de calibração e validação e, espacializados nas minibacias utilizando a ferramenta interna do modelo *Flow data*.

*Tabela 2 - Período de calibração e validação do modelo hidrológico, MGB.*

	<b>Calibração</b>	<b>Validação</b>
<b>Início</b>	01/01/1997	01/01/2010
<b>Fim</b>	01/01/2007	01/01/2020

Por fim, são necessários os dados climáticos, provenientes das normais climatológicas da estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) mais próximas da bacia de estudo, nesse estudo foram utilizados dados da estação x. Os dados são descritos através de médias mensais de temperatura (°C), umidade do ar (%), insolação (horas/dia), velocidade do vento (m/s) e pressão atmosférica (kPa). Quando os dados apresentam falhas o modelo adota valores da estação mais próxima para o cálculo das normais climatológicas das variáveis de clima citadas.

#### 4.2.3. PARÂMETROS FIXOS

O MGB utiliza diversos parâmetros que são definidos em diferentes etapas de sua aplicação para cada URH. Alguns dos parâmetros são definidos de antemão, os chamados parâmetros fixos, enquanto que os parâmetros mais sensíveis do modelo precisam ser calibrados (BUARQUE, 2015). Estes parâmetros fixos se referem a características da vegetação, sendo elas: albedo, o Índice de Área Foliar (IAF), altura da vegetação e resistência superficial. Os

parâmetros fixos foram definidos para cada URH de acordo com indicações de literatura disponibilizadas pelo próprio manual do modelo e são apresentados nas tabelas 3, 4, 5 e 6.

*Tabela 3 - Valores de albedo adotados no estudo.*

ALBEDO												
URH	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Floresta rasa	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Floresta profunda	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Agricultura rasa	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Agricultura profunda	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
Campo raso	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Campo profundo	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
Várzea	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Área semi-impermeável	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Água	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

*Tabela 4 - Valores de índice de área foliar (IAF) adotados no estudo.*

ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )												
URH	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Floresta rasa	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Floresta profunda	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Agricultura rasa	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Agricultura profunda	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Campo raso	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Campo profundo	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Várzea	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Área semi-impermeável	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Água	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

*Tabela 5 - Valores de altura das árvores adotados no estudo.*

ALTURA DAS ÁRVORES (m)												
URH	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Floresta rasa	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Floresta profunda	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Agricultura rasa	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Agricultura profunda	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Campo raso	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Campo profundo	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Várzea	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Área semi-impermeável	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Água	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

*Tabela 6 - Valores de resistência superficial adotados no estudo.*

RESISTÊNCIA SUPERFICIAL (s/m)												
URH	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Floresta rasa	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Floresta profunda	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Agricultura rasa	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Agricultura profunda	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Campo raso	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Campo profundo	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Várzea	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Área semi-impermeável	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Água	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

#### 4.2.4. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Os parâmetros considerados calibráveis no modelo, são definidos assim, pois são aos quais a vazão simulada é mais sensível e relacionam-se ao balanço de água no solo, sendo: armazenamento máximo de água no solo ( $W_m$ ), parâmetro relacionado ao escoamento subsuperficial ( $K_{int}$ ), subterrâneo ( $K_{bas}$ ), Parâmetro relacionado ao tempo de propagação do escoamento superficial ( $CS$ ), parâmetro propagação subsuperficial ( $CI$ ), subterrâneo ( $CB$ ) e parâmetro relacionado entre o armazenamento e a saturação de água ( $b$ ).

Os parâmetros de controle da redução da drenagem intermediária ou subsuperficial do solo (XL), parâmetro associado à capilaridade do solo (CAP) e o parâmetro referente ao limite de armazenamento para que ocorra fluxo ascendente ou descendente no solo (WC), apesar de serem passíveis de serem alterados foram mantidos em seus valores padrão sugerido pelo modelo.

O processo de calibração do modelo MGB iniciou de forma manual sendo inseridos valores médios sugeridos pelo modelo e, alterando valores do solo em todas sub-bacias a cada simulação. Após diversas alterações e simulações, o processo de calibração passou a utilizar o calibrador automático inserido no programa, afim de melhorar os resultados encontrados.

### 4.3. MGB-SED

Com o modelo hidrológico calibrado e validado é necessário realizar o mesmo processo no modelo de sedimentos: pré-processamento, aquisição de dados hidrossedimentológicos, definição dos parâmetros calibráveis e, por fim, calibração validação, segundo Buarque (2015) na etapa de pré-processamento são definidos os dados a serem utilizados para as métricas de desempenho do modelo e a definição dos parâmetros iniciais da MUSLE. Segundo Fagundes (2018) esse pré-processamento fornece informações necessárias para que a produção de sedimentos da bacia e o transporte do rio sejam computados durante a simulação do MGB-SED. Os itens a seguir apresentam a obtenção dos parâmetros iniciais da MUSLE, calibração, validação do modelo de sedimentos e alterações para representação de movimentos de massa nas simulações.

#### 4.3.1. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS

Para realizar as simulações no modelo hidrossedimentológico, MGB-SED, são necessários dados dos parâmetros da MUSLE, equação x, dentre eles, quatro são obtidos por rotinas do modelo, são eles:  $D_{sup}$  e  $q_{pico}$  obtidos pela modelagem hidrológica do modelo,  $A_{pm}$  é a área de cada *pixel* do MDE e o fator de comprimento e declive (LS), que é determinado no pré-processamento, sendo calculado para cada pixel do MDE, gerando resultado acumulado por URH, por minibacias. Dessa forma, os parâmetros calibráveis do modelo são parâmetros  $P$  (práticas conservacionistas),  $FG$  (fator de fragmentos grosseiros),  $C$  (fator de usos e cobertura do solo) e  $K$  (fator de erodibilidade do solo) e os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$ .

Os parâmetros  $P$  e  $FG$  foram mantidos como valores unitários como apresentado na proposição do modelo de Buarque (2015) e os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  também não foram alterados nas simulações realizadas mantendo seus valores padrão 11,8 e 0,56, respectivamente. Assim

foram estimados valores iniciais apenas dos parâmetros *K* e *C*.

### 3.2.2.1. FATOR DE ERODIBILIDADE DO SOLO (*K*)

Conforme apresentado anteriormente a equação 6, considerada as porcentagens de argila, silte e areia para o cálculo do fator de erodibilidade do solo (*K*). Para realizar a estimativa das porcentagens foi usado o mapa de tipos de solo da FAO (2007), com os usos do solo da EMBRAPA (2006) e, de acordo com as proposições de Fan et al. (2015) que correlacionam os tipos de solo da EMBRAPA com cada Unidade de Resposta Hidrológica do mapa da América Latina. O resultado da relação supracitada é apresentado na tabela 7.

*Tabela 7 – Tipos de solos FAO presentes da bacia do Rio dos Sinos correlacionado com os tipos de solo da EMBRAPA e as porcentagens de areia, silte, argila e carbono orgânico.*

Solo FAO	Solo EMBRAPA	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	orgC (%)
Eutric Planosols	Planossolos	53.6	15.8	30.6	2.25
Eutric Regosols	Neossolos Regolíticos	71.6	15.2	13.2	0.45
Humic Ferralsols	Latossolos	12.8	21.6	65.5	3.49
Luvic Phaeozems	Chernossolos	39.1	26.5	34.6	1.46
Mollic Solonetz	Planossolos Nátricos	51.7	31.9	16.4	1.14
Orthic Acrisols	Argissolos	53.6	15.8	30.6	2.25

### 3.2.2.2. FATOR DE USO E COBERTURA DO SOLO (*C*)

Para as estimativas iniciais do fator *C*, para cada URH, foi realizada uma revisão bibliográfica que através de diversos estudos, definiu valores de referência para as coberturas do solo de floresta, agricultura, campo e áreas semi-impermeáveis, apenas para a URH de várzea não foram encontrados valores de referência. Os valores do fator *C* encontrados para cada tipo de cobertura do solo são apresentados na tabela 8

Tabela 8 - Fator C definidos na bibliografia.

Floresta	Mata ciliar (0,012) <sup>1</sup> ; Floresta (0,005 <sup>2</sup> ; 0,001 - 0,006 <sup>3</sup> ; 0,001 <sup>4</sup> ; 0,0001 - 0,003 <sup>8</sup> ); Floresta com Vegetação Rasteira (0,002) <sup>7</sup> ; Floresta sem Vegetação Rasteira (0,003) <sup>7</sup> ; Floresta Média (0,001) <sup>4</sup>	<sup>1</sup> Farinasso et al. (2006); <sup>2</sup> Dymond (2010); <sup>3</sup> David (1988); <sup>4</sup> Morgan (2005); <sup>5</sup> Fernandez et al. (2003); <sup>6</sup> Dumas & Fossey (2009); <sup>7</sup> Kuok et al. (2013); <sup>8</sup> Branco (1998).
Agricultura	Agricultura Irrigada (0,018) <sup>1</sup> ; Agricultura Sequeiro (0,018) <sup>1</sup> ; Colheita (0,128 <sup>5</sup> ; 0,01 <sup>6</sup> ); Soja (0,2 - 0,5) <sup>4</sup> ; Arroz (0,1 - 0,2) <sup>4</sup> ; Agricultura em Estágio Inicial (0,2) <sup>7</sup> ; Agricultura em Estágio Final (0,05) <sup>7</sup> ; Culturas (0,11) <sup>8</sup> ; Milho (0,3 - 0,01) <sup>8</sup> .	
Campo	Cerrado (0,042) <sup>1</sup> ; Pasto (0,01 <sup>2</sup> ; 0,1 <sup>4</sup> ; 0,4 - 0,004 <sup>8</sup> ); Grama (0,007) <sup>7</sup> ; Pastagens (0,022) <sup>8</sup> ; Campos Limpos (0,038) <sup>8</sup> ,	
Várzea	-	
Área semi-impermeável	Áreas Urbanas (0,00011; 0,2 <sup>3</sup> ; 0,03 <sup>5</sup> ; 0 <sup>6</sup> ); Assentamento (0,25) <sup>7</sup> .	

#### 4.3.2. DADOS SEDIMENTOLÓGICOS

A partir da disponibilidade de dados sedimentos nas estações foram definidos os períodos de calibração e validação do modelo, apresentados nas tabelas 9 e 10, junto com a quantidade de dados em cada período. Sendo que a estação Taquara Montate (87374000) possui um período de dados medidos de apenas 10 anos, dessa forma, para o período de validação foi utilizada apenas a estação Campo Bom (87380000).

Tabela 9 - Resumo período e dados da calibração.

Resumo dados da calibração			
	Início	Fim	Dados
87380000	01/01/2010	31/12/2019	34
87374000	01/01/2010	31/12/2019	36

Tabela 10 - Resumo período e dados da validação.

Resumo dados da validação			
	Início	Fim	Dados
87380000	01/01/1997	31/12/2006	29

#### 4.3.3. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

A calibração do modelo foi realizada manualmente, alterando valor de parâmetros da MUSLE, o fator C foi alterado de forma individual para cada sub-bacia, o mesmo ocorrendo

com as concentrações de areia, silte e argila, que ao serem alterados modificam o valor do fator K. Foram realizadas entre 50 e 100 simulações afim de encontrar os melhores valores para a calibração do modelo. Com a condição de calibração satisfeita foi realizada a validação do modelo. Tanto a calibração quanto a validação usaram as métricas de desempenho para comparar dados de concentração de sedimentos, em suspensão em miligramas por litro (mg/L), e a descarga sólida em suspensão, expressa em toneladas por dia (ton/dia).

Por conta da falta de dados observados nos postos fluviométricos, na calibração e a validação do modelo foi realizada uma análise visual dos resultados, afim de compreender se o modelo atingiu as amplitudes dos dados observados disponíveis, e apresentou coerência entre os valores observados.

Alguns dados observados apresentaram valores muito acima do esperado para períodos sem ocorrência de precipitação próxima ou fatores que aumentassem a produção de sedimentos locais, dessa forma, foram realizadas duas análises para períodos com esse tipo de dado, considerando-os e não os considerando, este fato será abordado novamente na apresentação dos resultados.

#### **4.4. GATILHOS E MULTIPLICADOR PARA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS POR MOVIMENTOS DEMASSA**

Este trabalho visa verificar a possibilidade da simulação de movimentos de massa no modelo de sedimentos MGB-SED. As condições que favorecem os movimentos de massa dependem principalmente da estrutura geológica, declividade da vertente (forma topográfica), regime de chuvas (em especial de episódios pluviais intensos), perda de vegetação e da atividade antrópica, bem como pela existência de espessos mantos de intemperismo, além da presença de níveis ou faixas impermeáveis que atuam como planos de deslizamentos (BIGARELLA et al., 2003). Assim, para realização das simulações desses eventos foram definidos, com base na bibliografia e dados disponíveis, dois gatilhos, sendo um pluviométrico e um fator da topografia, e um multiplicador na rotina de cálculo da MUSLE. Os itens a seguir detalham o processo de obtenção e criação destes mecanismos.

##### **4.4.1. GATILHO PLUVIOMÉTRICO**

A chuva não é um agente direto para ocorrência de movimentos de massa, sendo fator de influência indireta, pois o volume precipitado, ao infiltrar altera características do solo, que influenciam diretamente na ocorrência dos movimentos de massa, por exemplo, o aumento do peso específico do solo devido à retenção de parte da água infiltrada (IPT, 1991) com base nessa informação foi realizada uma revisão bibliográfica acerca de volumes diários

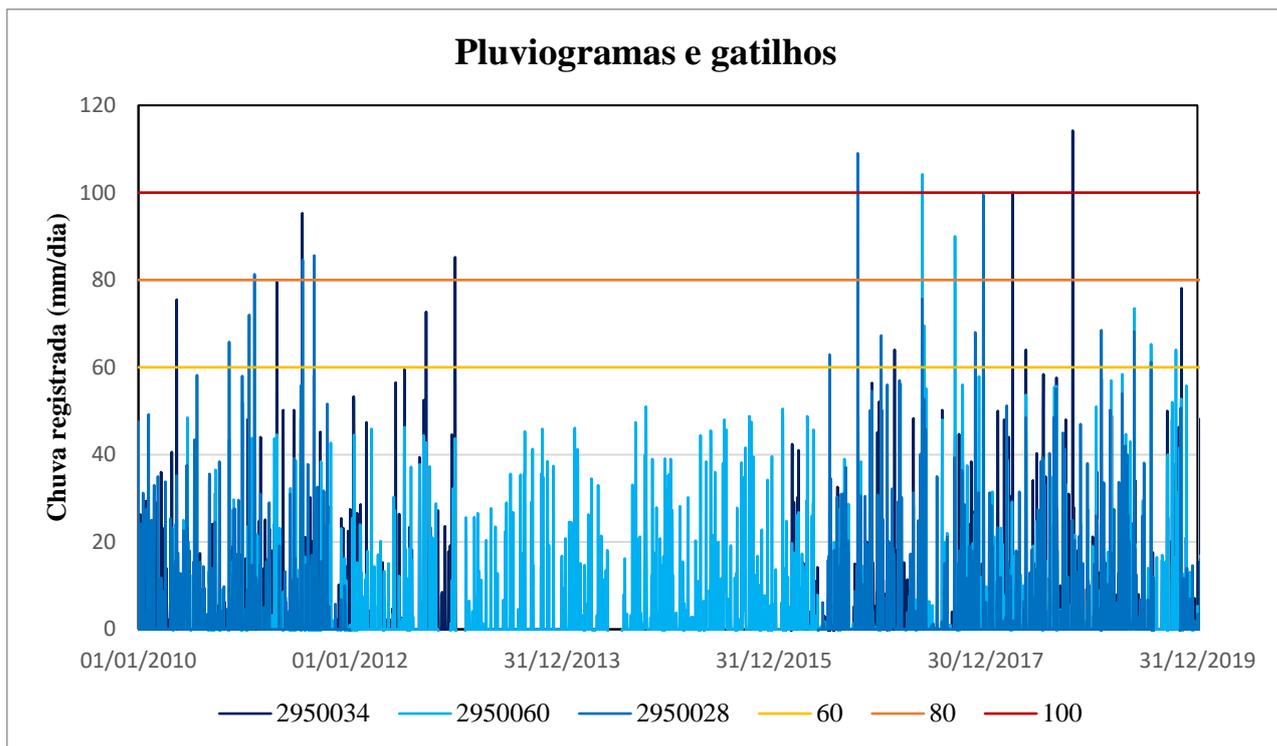
precipitados que geraram ocorrências deste tipo de evento. A tabela 11 apresenta os volumes mínimos e máximos de chuvas associados a movimentos de massa, sendo que em CAINE (1980) foi realizada uma revisão com mais de setenta dados de diferentes locais do mundo.

*Tabela 11 - Gatilhos pluviométricos de movimentos de massa na bibliografia.*

Volume em 24 h (mm)		
Mínimo	Máximo	Fonte
2	715	CAINE (1980)
2	~200	GERMAIN (2021)
50	97	COE (2004)

Foi realizada uma análise das estações pluviométricas mais próximas ao município de Rolante – RS, com dados para o período das simulações de estudo (01/01/2010-01/01/2020), sendo escolhidas as estações: 2950034, 2950060 e 2950028. Inicialmente foi notada falta de valores medidos entre dezembro/2012 a março de 2016, nas estações 2950028 e 2950060, poucos picos acima de 100 mm e, por fim, baixos volumes precipitados nos períodos de ocorrência dos movimentos de massa na região, 05/01/2017. Para resultados mais coerentes na simulação foi gerada uma precipitação sintética de 180 mm na cabeceira do rio Rolante, conforme descrito em SEMA e GPDEN/IPH/UFRGS (2017).

Com base nos valores apresentados na tabela 10 e nos dados pluviométricos disponíveis próximos do município de Rolante - RS, foram definidos três valores a serem testados para o gatilho pluviométrico, com os critérios da escolha se baseando na ocorrência nos dados observados e na bibliografia. Dessa forma, os gatilhos foram definidos como: muito acionado (60 mm), moderadamente acionado (80 mm) e pouco acionado (100 mm), sendo os mesmos acionados, respectivamente 43, 14 e 3 vezes, figura 17.



*Figura 17 - Pluviograma das 3 estações mais próximas ao município de Rolante-RS e limiares dos gatilhos propostos.*

#### 4.4.2. GATILHO FATOR LS ACUMULADO

Como citado anteriormente, a declividade da vertente é um fator com influência direta na ocorrência de movimentos de massa. No modelo de sedimentos MGB-SED não é realizada a entrada de um arquivo com as declividades em cada pixel, porém na etapa de pré-processamento é calculado a partir do MDE, o fator topográfico LS para cada pixel, sendo posteriormente acumulado para cada URH da minibacias. Foi gerado o mapa de declividades da bacia do Rio dos Sinos (figura 18), afim de auxiliar visualmente na análise das minibacias selecionadas. O gatilho de declividade proposto utiliza este fator LS acumulado para cada URH da minibacias, sendo definido de forma visual utilizando ferramentas de geoprocessamento e o mapa de declividade apresentado na figura 18. Novamente foram propostos valores afins de cobrir da mais, até a menos abrangente das declividades da bacia, dessa forma os valores para o gatilho foram, maior que 110000, 100000, 90000 e 80000. Respectivamente esses valores selecionam 90, 99, 112 e 137 minibacias, sendo elas apresentadas nas figuras 19, 20, 21 e 22.

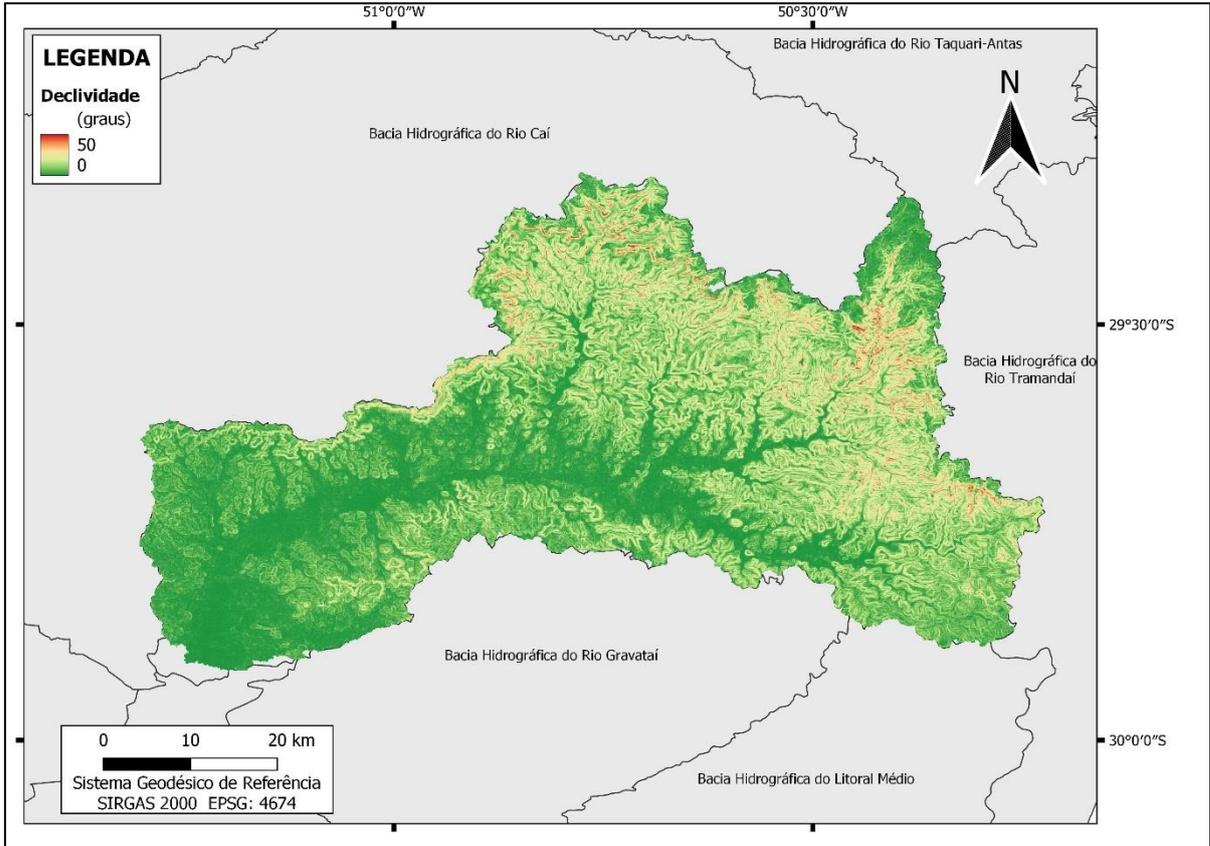


Figura 18 - Declividades da bacia do Rio dos Sinos.

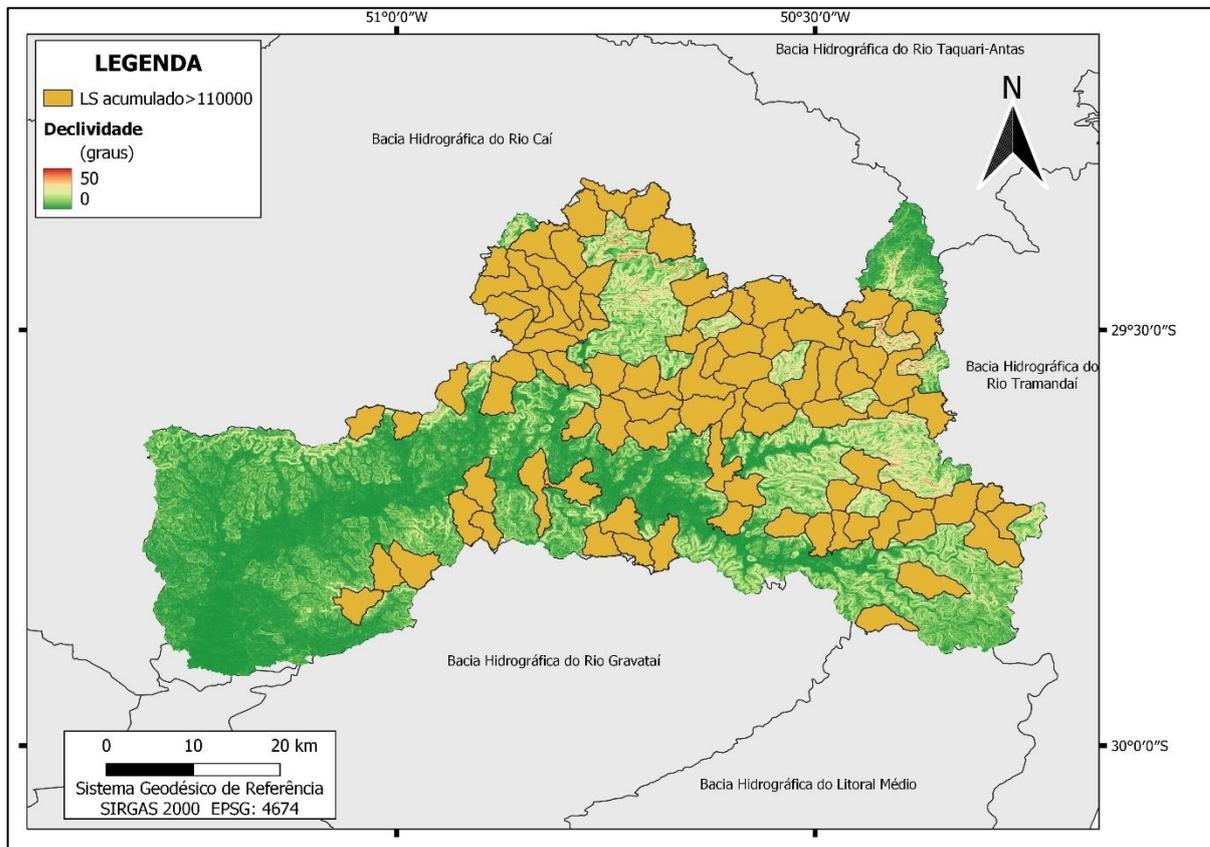


Figura 19 – Minibacias com fator LS acumulado acima de 110000 em uma URH, sobre mapa da declividade da bacia.

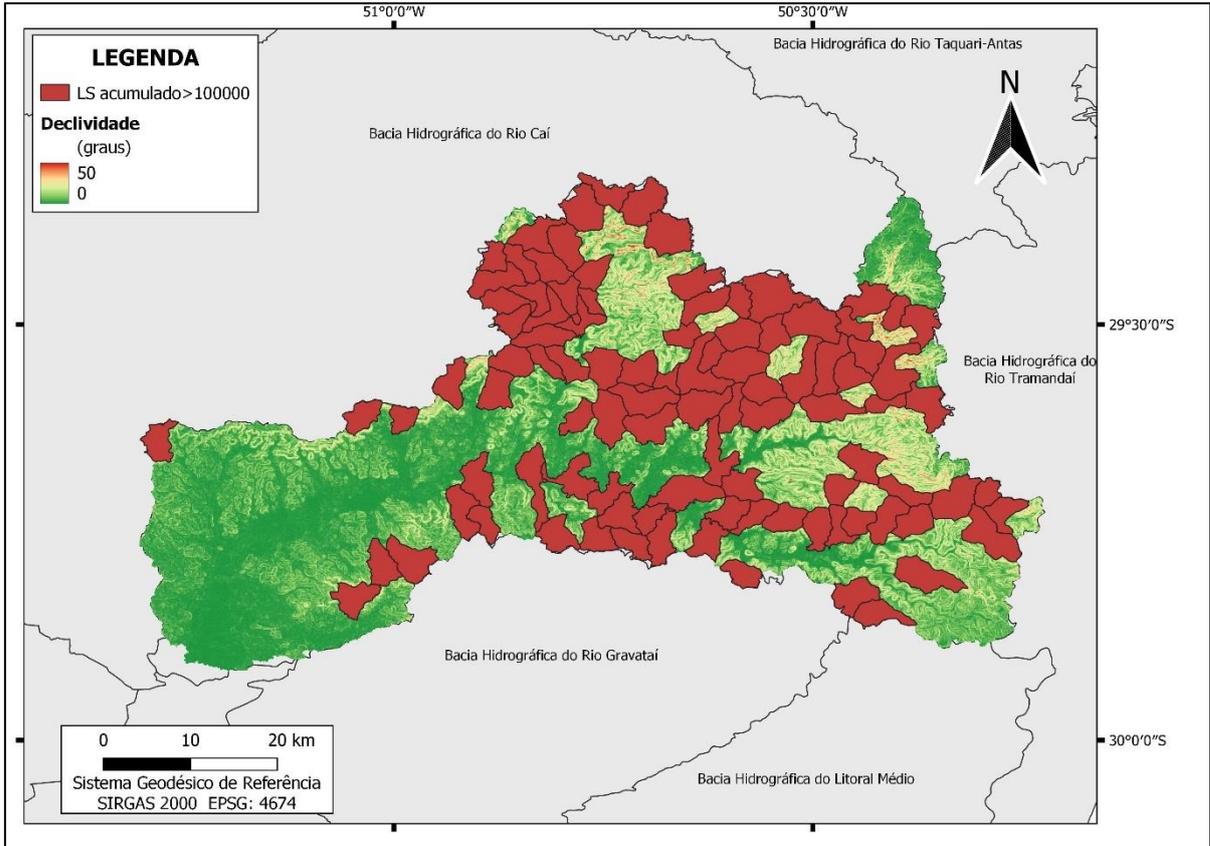


Figura 20 - Minibacias com fator LS acumulado acima de 100000 em uma URH, sobre mapa da declividade da bacia.

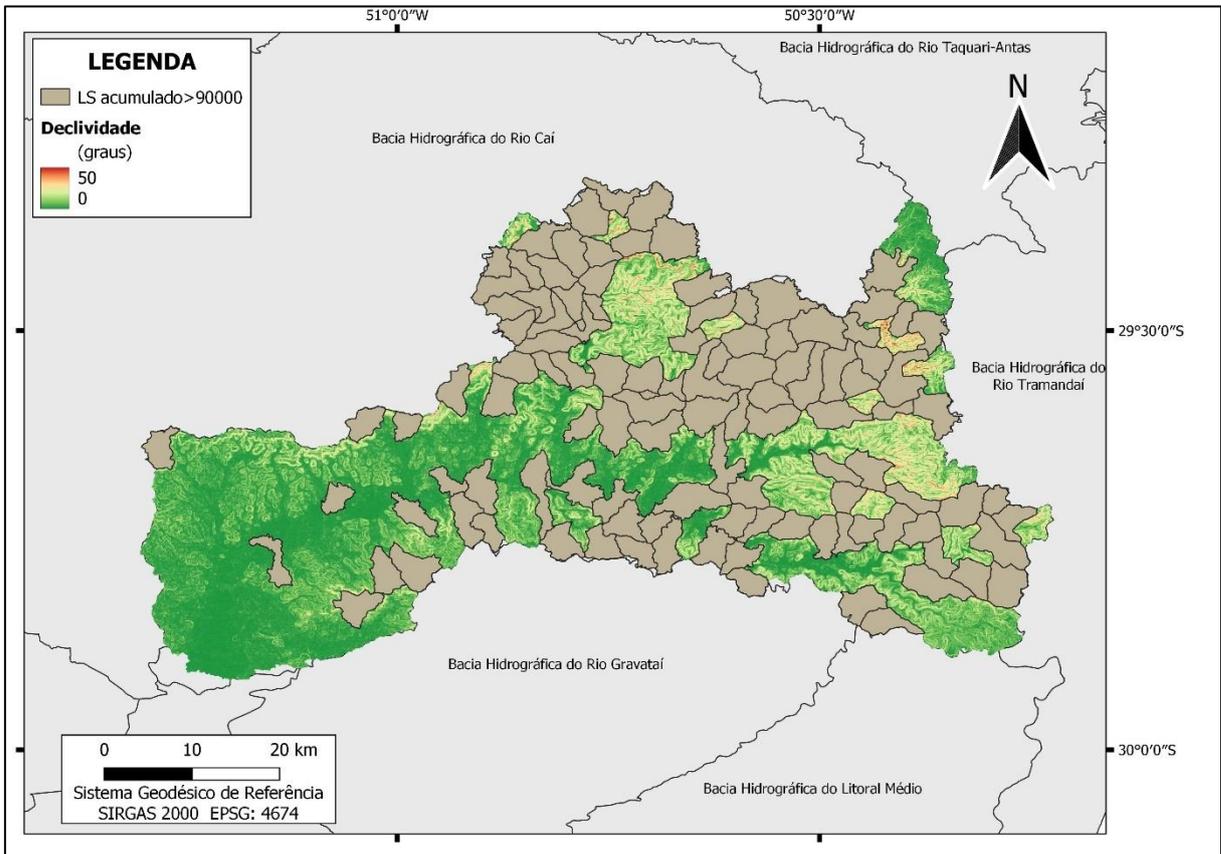


Figura 21 - Minibacias com fator LS acumulado acima de 90000 em uma URH, sobre mapa da declividade da bacia.

Implementação de Gatilhos para Simulação da Produção de Sedimentos por Movimentos de Massa no MGB-SED

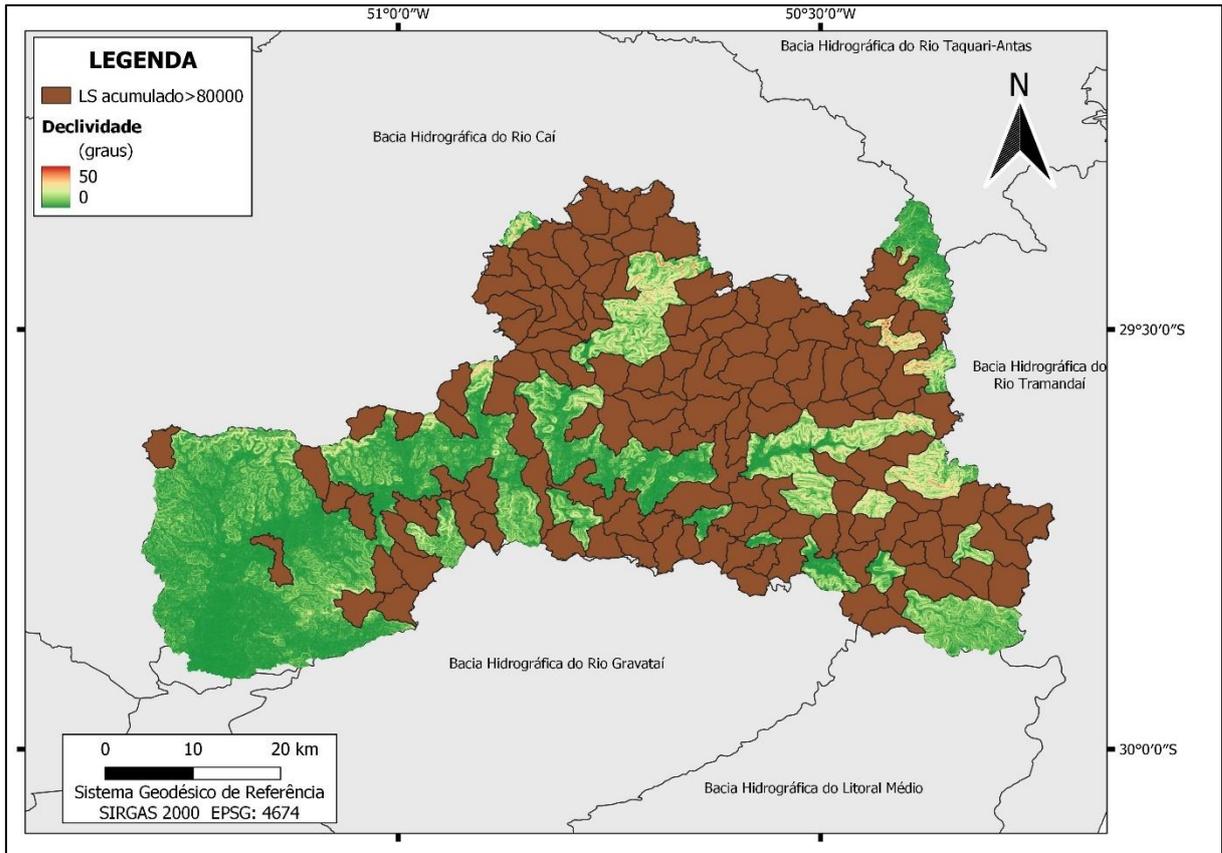


Figura 22 - Minibacias com fator LS acumulado acima de 80000 em uma URH, sobre mapa da declividade da bacia.

#### 4.4.3. MULTIPLICADOR

A equação da MUSLE não foi proposta com intuito de calcular movimentos de massa, dessa forma, se mostrou necessária a adição de um fator multiplicador quando os gatilhos citados anteriormente são disparados. Assim, com base na escala de processos dos modelos de sedimentos apresentada em Fagundes (2018) e tamanhos das minibacias foram definidos três valores para testar o fator multiplicador, sendo eles 10, 15 e 20 vezes o cálculo da MUSLE para a URH da minibacias.

### 4.5. MÉTODOS DE COMPARAÇÃO

Para verificar a acurácia das simulações realizadas, nas etapas de calibração, validação, testes dos gatilhos e multiplicador, foram selecionadas métricas de desempenhos consagradas para modelagem hidrológica e hidrossediementológica, sendo os coeficientes de Nash-Sutcliffe (NASH), Correlação de Pearson ( $r$ ) e o erro de Volume ( $\Delta V$ ), respectivamente equações 17, 18 e 19, para ambos os modelos analisados. O MGB calcula diretamente os coeficientes de Nash-Sutcliffe (NASH), Nash-Sutcliffe aplicado ao logaritmo (NASH-LOG) e o erro de Volume ( $\Delta V$ ), porém o (NASH-LOG) foi removido da análise, visto que a boa correlação com valores

mínimos é de pouca relevância neste trabalho. Diferentemente do modelo hidrológico, o MGB-SED não realiza os cálculos destas métricas automaticamente, assim, foram elaboradas planilhas no Excel que realizassem o cálculo destas métricas com os valores calculados nas etapas de calibração, validação, testes dos gatilhos e multiplicador.

#### 4.5.1. COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA DE NASH-SUTCLIFFE (NASH)

O Nash-Sutcliffe é uma estatística normalizada que indica o quanto as previsões do modelo são melhores que aquelas de um modelo que prevê somente a média dos dados observados (PAIVA, 2009).

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - X_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i^{obs} - \bar{X}^{sim})^2}$$

*Equação 15*

Os valores de NASH variam entre  $-\infty$  e 1, sendo que quanto mais próximo do valor de 1 melhor o modelo é capaz de representar os valores observados. Enquanto valores negativos indicam que a média dos valores observados apresenta maior representatividade do que os resultados simulados (MORIASI *et al.*, 2007).

#### 4.5.2. PORCENTAGEM DE ERRO DE VOLUME ( $\Delta V$ )

A porcentagem de erro de volume é uma forma de avaliar se existe um desvio sistemático de superestimativa ou subestimativa da vazão. O valor ótimo da métrica é 0 e quanto menor a magnitude do resultado, maior a acurácia do modelo. Valores positivos, indicam que o modelo subestima os dados simulados em relação aos dados observados, enquanto negativos, significa que o modelo superestima os valores simulados (MORIASI, *et al.*, 2007). Na tabela x são apresentadas as faixas desempenho do erro de volumes.

$$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^n X_i^{sim} - \sum_{i=1}^n X_i^{obs}}{\sum_{i=1}^n X_i^{obs}} \cdot 100$$

*Equação 16*

#### 4.5.3. COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON ( $r$ )

O coeficiente de correlação de Pearson descreve o grau de colinearidade entre os dados simulados e os dados observados, variando entre -1 e 1. Quando o valor é igual a zero significa que não existe nenhuma relação linear entre os resultados simulados e observados. Quanto mais próximos os valores chegam de -1 e 1 o coeficiente indica perfeita uma perfeita correlação, negativa ou positiva, respectivamente (MORIASI *et al.*, 2007). As faixas desempenho da

métrica são apresentadas na tabela X.

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x}) \cdot (y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \cdot (y - \bar{y})^2}}$$

Equação 17

#### 4.5.4. FAIXAS DE QUALIDADE DAS MÉTRICAS DE DESEMPENHO

Neste estudo são utilizadas as faixas de aceitação propostas por Moriasi et al. (2007) para as simulações hidrológica e hidrossedimentológica. No estudo citado a discretização é mensal, porém os modelos MGB e MGB-SED utilizam discretização diária dos dados, em virtude da boa apresentação de resultados na escala de análise foram mantidas as faixas dos parâmetros para o modelo hidrológico, já o modelo hidrossedimentológico enfrenta maiores dificuldades na realização da modelagem, comparação com dados observados, devido a falta dos mesmos, e na diferença de discretização entre a métrica e o modelo, assim as faixas de classificação propostas por Moriasi *et al.* (2007) foram alteradas para valores pouco menores dos citados no estudo. A Tabela 12 apresenta as faixas das métricas para as simulações dos dois modelos, sendo elas definidas como: muito boas, boas, satisfatórias e insatisfatórias, de acordo com as métricas de desempenho empregadas para cada modelo.

Tabela 12 - Faixas de avaliação adotadas para os modelos hidrológico e de sedimentos.

Avaliação	Vazão			Sedimentos		
	NASH	$\Delta V$	r	NASH	$\Delta V$	r
Muito Bom	0,75 - 1,00	< 10	0,70 - 1,00	0,50 - 1,00	< $\pm 25$	0,70 - 1,00
Bom	0,65 - 0,75	$10 \leq \Delta V \leq \pm 15$	0,50 - 0,70	0,25 - 0,50	$\pm 25 \leq \Delta V \leq \pm 50$	0,50 - 0,70
Satisfatório	0,50 - 0,65	$\pm 15 \leq \Delta V \leq \pm 25$	0,30 - 0,50	0,05 - 0,25	$\pm 50 \leq \Delta V \leq \pm 70$	0,30 - 0,50
Insatisfatório	$\leq 0,50$	$\geq \pm 25$	$\leq 0,30$	$\leq 0,05$	$\geq \pm 70$	$\leq 0,30$

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item são apresentados os resultados obtidos nos modelos hidrológico e de sedimentos nos períodos de calibração e validação e, resultados obtidos com o modelo de sedimentos alterado para representação de movimentos de massa.

### 5.1. MBG-IPH

A seguir são apresentados os resultados gerados no modelo hidrológico no período de calibração e validação na bacia do Sinos, sendo apresentados hidrogramas das estações Taquara Montante (87374000), Campo Bom (87380000) e São Leopoldo (87382000) e no fim a apresentação das respectivas métricas de desempenho.

#### 5.1.1. CALIBRAÇÃO

Nos próximos itens são apresentados, em formato de hidrogramas e tabela com as métricas de desempenho, os resultados referentes às vazões simuladas para o período de calibração, entre 01/01/1997 e 01/01/2007.

##### 5.1.1.1. PARÂMETROS CALIBRÁVEIS

Os valores finais adotados para os parâmetros calibráveis do modelo hidrológico, MGB, para as 6 sub-bacias são apresentados nas tabelas 13, 14 e 15. Os parâmetros foram calibrados usando o método manual de alteração e simulação e, posteriormente, o calibrador automático interno do modelo, sendo agrupados em duas sub-bacias que tem em seu exutório uma estação fluviométrica. Por conta do uso do calibrador automático alguns valores obtidos nos parâmetros calibráveis não são fisicamente coerentes.

*Tabela 13 – Valores dos parâmetros calibráveis do MGB utilizados nas sub-bacias 1 e 6.*

Sub-bacias 1 e 6							
Uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Floresta rasa	187	0,01	1,7	826	0,6	0	0,1
Floresta profunda	171	0,01	6,6	332	0,6	0	0,1
Agricultura rasa	31	0,02	2,2	68	0,6	0	0,1
Agricultura profunda	277	0,02	1,3	579	0,6	0	0,1
Campo raso	32	0,02	0,9	112	0,6	0	0,1
Campo profundo	139	0,33	12,8	609	0,6	0	0,1
Várzeas	888	0,01	0,1	7	0,6	0	0,1
Área impermeável	1222	0,01	0,2	10	0,6	0	0,1
Água	0	0	0,0	0	0	0	0
CS	2						
CI	69						
CB	10194						
QB m <sup>3</sup> /Skm <sup>2</sup>	0,015						

Tabela 14 – Valores dos parâmetros calibráveis do MGB utilizados nas sub-bacias 2 e 4.

Sub-bacias 2 e 4							
Uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Floresta rasa	361	0,02	1,2	57	0,6	0	0,1
Floresta profunda	363	0,01	1,3	78	0,6	0	0,1
Agricultura rasa	75	0,08	0,4	6	0,6	0	0,1
Agricultura profunda	711	0,01	0,2	95	0,6	0	0,1
Campo raso	92	0,45	0,8	16	0,6	0	0,1
Campo profundo	116	0,02	1,0	24	0,6	0	0,1
Várzeas	187	0,06	0,1	3	0,6	0	0,1
Área impermeável	434	0,06	0,1	4	0,6	0	0,1
Água	0	0	0	0	0	0	0
CS	2						
CI	153						
CB	10354						
QB m <sup>3</sup> /Skm <sup>2</sup>	0,03						

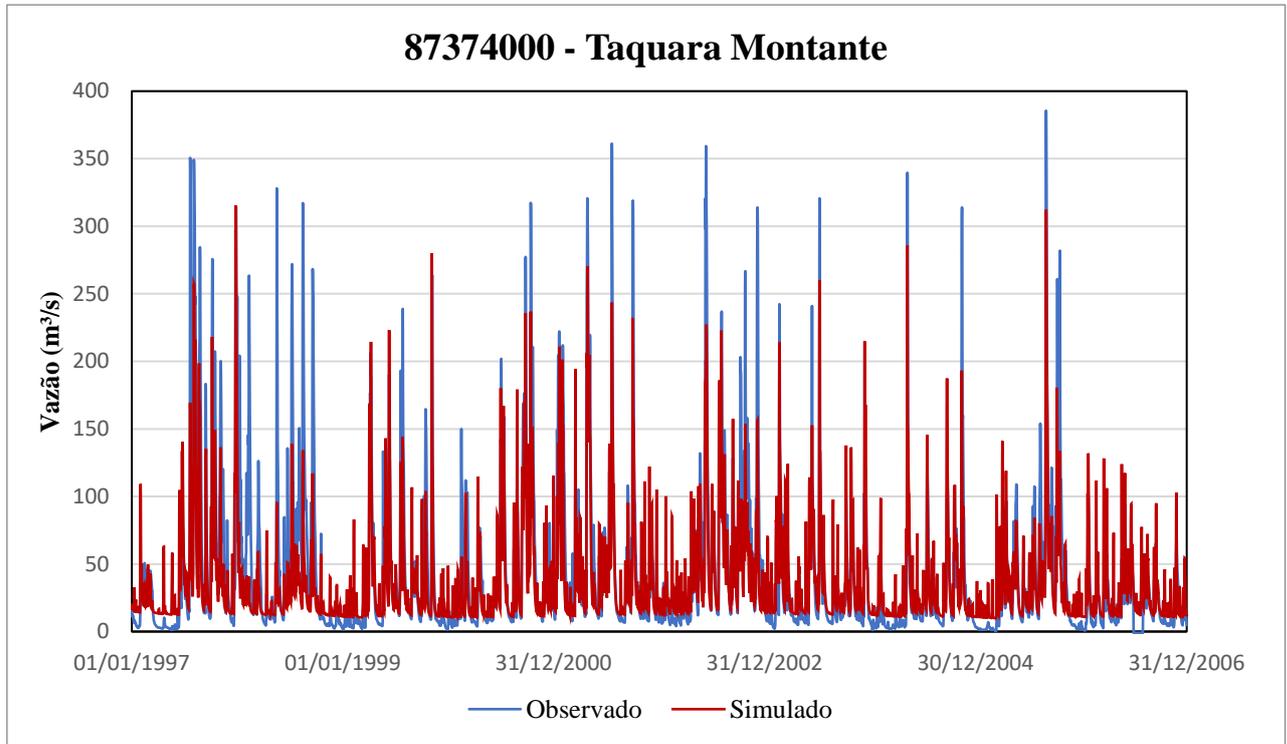
Tabela 15 – Valores dos parâmetros calibráveis do MGB utilizados nas sub-bacias 3 e 5.

Sub-bacias 3 e 5							
Uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Floresta rasa	269	0,01	0,0	997	0,6	0	0,1
Floresta profunda	247	0,01	0,3	2012	0,6	0	0,1
Agricultura rasa	130	0,07	0,0	71	0,6	0	0,1
Agricultura profunda	293	0,03	0,1	4670	0,6	0	0,1
Campo raso	77	1,64	0,1	12	0,6	0	0,1
Campo profundo	272	0,06	0,2	1472	0,6	0	0,1
Várzeas	285	0,01	0,2	12	0,6	0	0,1
Área impermeável	1148	0,08	0,2	4	0,6	0	0,1
Água	0	0	0	0	0	0	0
CS	3						
CI	279						
CB	10194						
QB m <sup>3</sup> /Skm <sup>2</sup>	0,015						

#### 5.1.1.2. HIDROGRAMAS

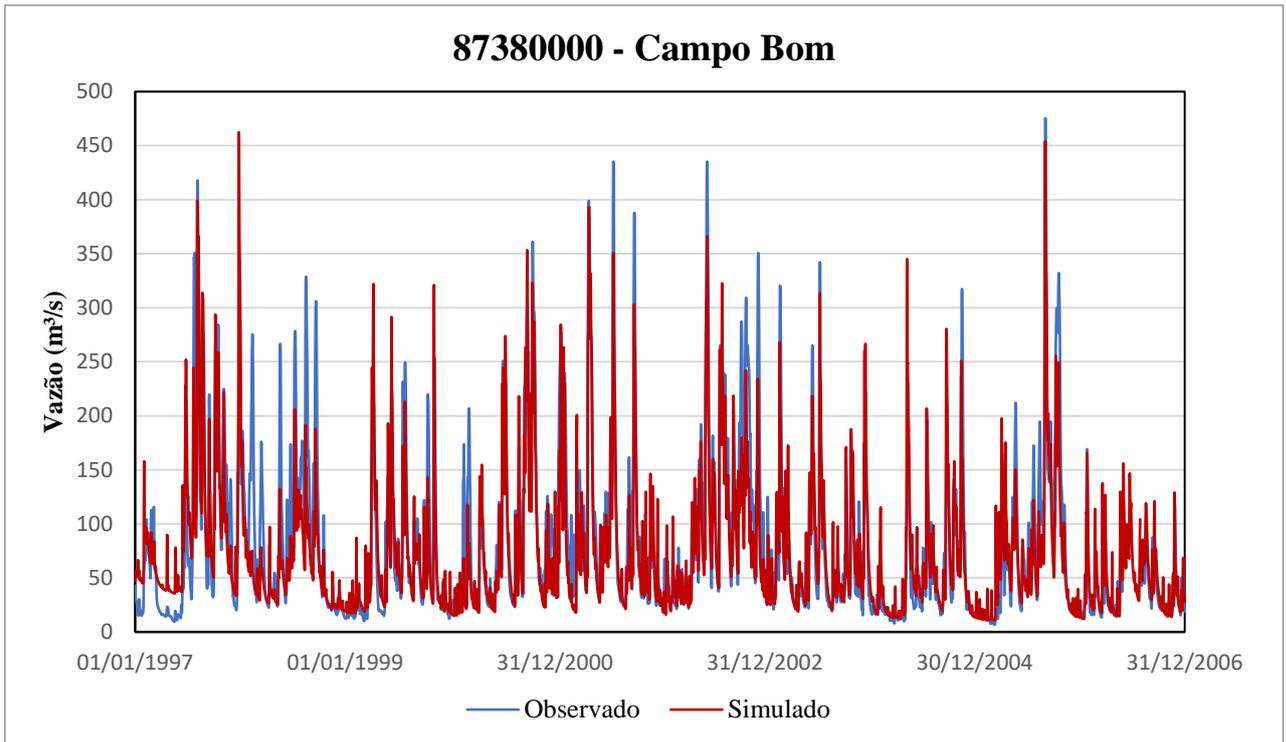
A seguir são apresentados os hidrogramas das vazões observadas e simuladas, referentes aos três postos fluviométricos com grande período de dados de vazões na bacia. Os hidrogramas serão apresentados do mais montante para o mais a jusante da bacia, sendo assim: Taquara Montante (87374000), Campo Bom (87380000) e São Leopoldo (87382000).

A figura 23 apresenta os hidrogramas observado e simulado da estação fluviométrica Taquara Montante, de código 87374000, é perceptível uma subestimação dos picos nos hidrogramas simulados, com uma boa representação do comportamento do rio na bacia, as métricas de desempenho para a estação foram consideradas muito satisfatórias.



*Figura 23 – Hidrogramas observados e simulados no período de calibração, na estação Taquara Montante (87374000).*

A figura 24 apresenta os hidrogramas observado e simulado da estação fluviométrica Campo Bom, de código 8738000, na simulação dessa estação ocorreram picos com subestimação e picos com superestimação em comparação com o hidrograma observado. A estação apresentou uma boa representação do comportamento do rio e, as métricas de desempenho para a estação foram consideradas muito satisfatórias.



*Figura 24 – Hidrogramas observados e simulados no período de calibração, na estação Campo Bom (87380000).*

A figura 25 apresenta os hidrogramas observado e simulado da estação fluviométrica São Leopoldo, de código 87382000, na simulação dessa estação assim como na estação anterior ocorreram picos com subestimação e picos com superestimação em comparação com o hidrograma observado. A estação apresentou uma boa representação do comportamento do rio e, as métricas de desempenho para a estação foram consideradas muito satisfatórias.

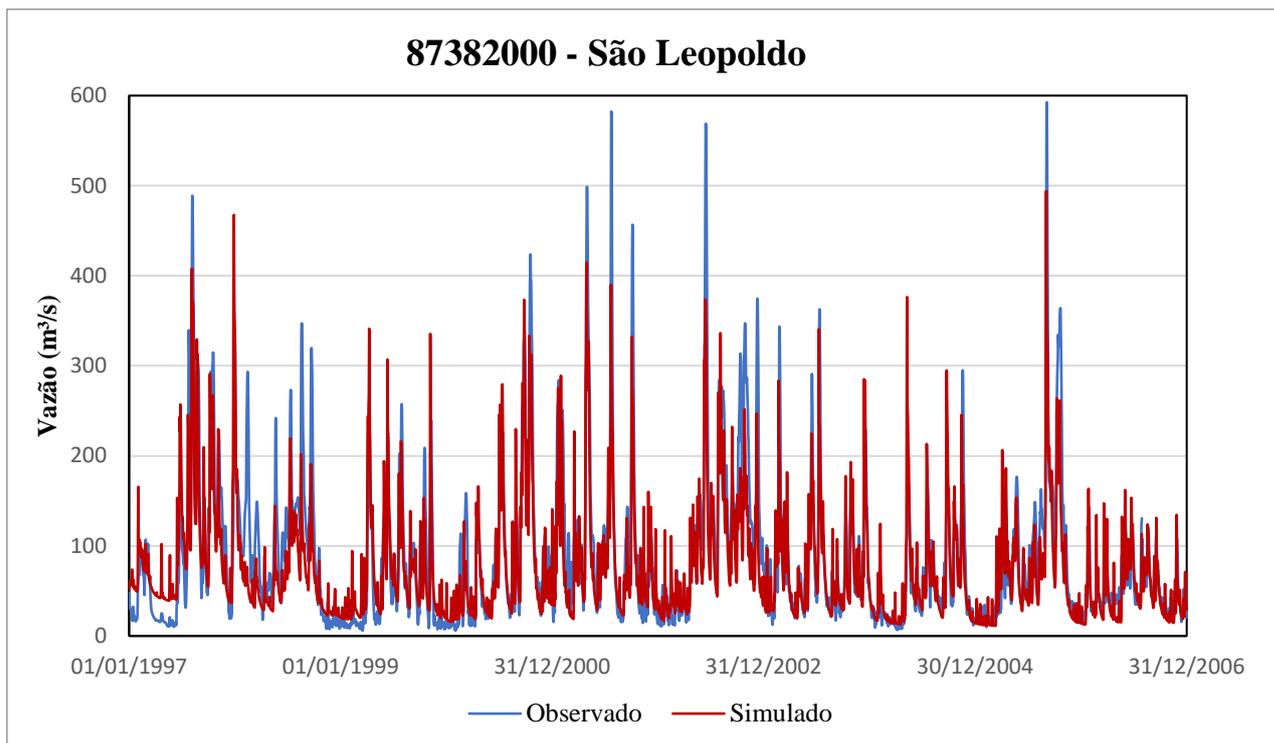


Figura 25 – Hidrogramas observados e simulados no período de calibração, na estação São Leopoldo (87382000).

#### 5.1.1.3. MÉTRICAS

A tabela 16 apresenta os postos fluviométricos utilizados na calibração do modelo hidrológico, de montante a jusante e os resultados das métricas de desempenho, Nash-Sutcliffe, Correlação de Pearson e erro de volumes ( $\Delta V$ ), para cada posto fluviométrico. Os postos que possuem dados de sedimentos estão grifados na tabela.

Tabela 16 – Resumo dos resultados das métricas de desempenho para vazões simuladas, referente ao período de calibração.

Valores das métricas para as vazões			
Estação	NASH	Pearson	$\Delta V$
<b>87374000</b>	<b>0.677</b>	<b>0.837</b>	<b>9.20%</b>
<b>87380000</b>	<b>0.891</b>	<b>0.885</b>	<b>10.22%</b>
87382000	0.864	0.858	12.96%

A partir da análise dos resultados apresentados na tabela 15 com as faixas de desempenho da tabela 11, é possível afirmar que calibração gerou bons resultados para as três estações analisadas, com avaliação Boa ou Muito Boa em todas métricas de desempenho. A estação 87374000 foi a que apresentou os piores valores de Nash-Sutcliffe, porém ainda sendo consideradas com uma avaliação Boa, a estação foi a única com erro de volume ( $\Delta V$ ) com avaliação ótima. No coeficiente de Pearson todas estações tiveram uma avaliação Muito Boa, com resultados próximos.

### 5.1.2. VALIDAÇÃO

Nos próximos itens são apresentados, em formato de hidrogramas e tabela com as métricas de desempenho, os resultados referentes às vazões simuladas para o período de validação, entre 01/01/2010 e 01/01/2020.

#### 5.1.2.1. HIDROGRAMAS

A seguir são apresentados os hidrogramas das vazões observadas e simuladas, referentes aos três postos fluviométricos com grande período de dados de vazões na bacia. Os hidrogramas serão apresentados do mais montante para o mais a jusante da bacia, sendo assim: Taquara Montante (87374000), Campo Bom (87380000) e São Leopoldo (87382000).

A figura 26 apresenta os hidrogramas observado e simulado da estação fluviométrica Taquara Montante, de código 87374000, assim como na calibração, a simulação gerou subestimação dos picos do hidrograma, a exceção se dá no pico do dia 05/01/2017, data que foi inserida precipitação de 180 mm, conforme comentado no item 4.4.1. Apesar de subestimar os picos a simulação gerou boa representação do comportamento do rio na estação, as métricas de desempenho foram consideradas muito satisfatórias.

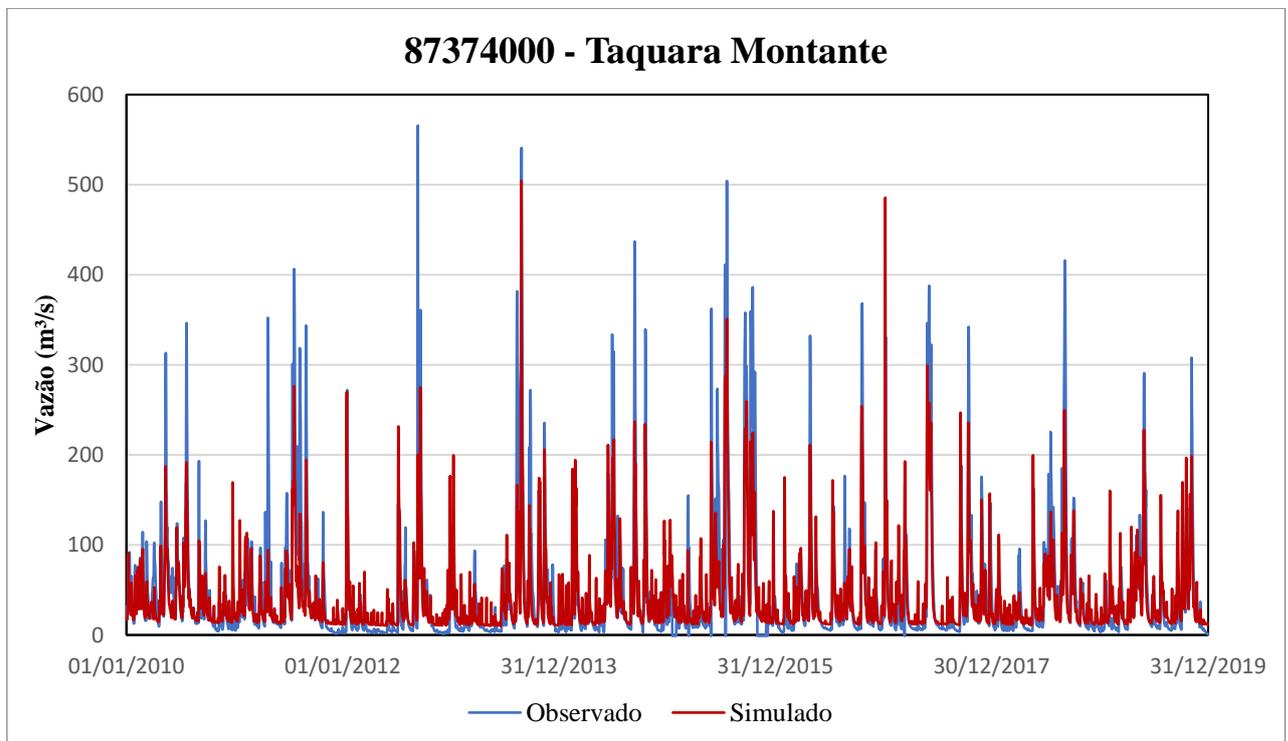
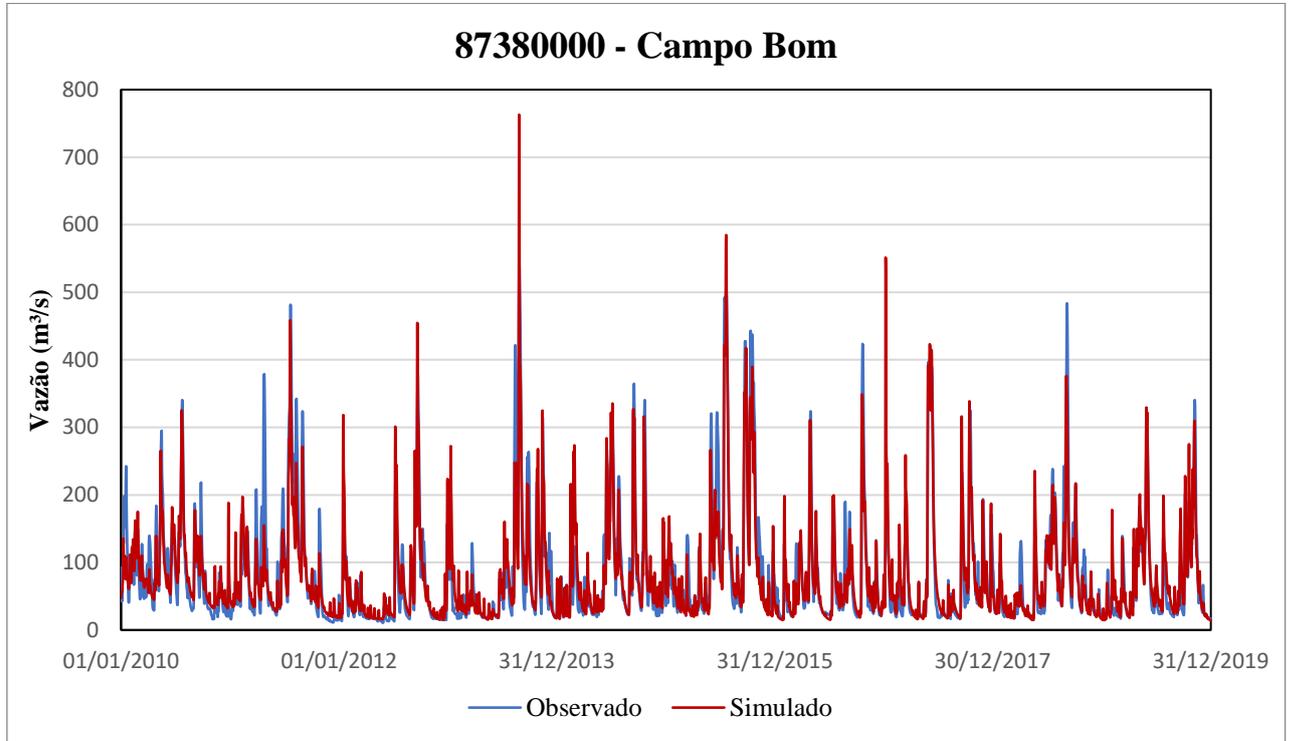


Figura 26 – Hidrogramas observados e simulados no período de validação, na estação Taquara Montante (87374000).

A figura 27 apresenta os hidrogramas observado e simulado da estação fluviométrica Campo Bom, de código 8738000. Nesta estação a simulação não gerou predominância de subestimação ou superestimação dos picos em relação ao observado. Na estação a simulação

apresentou uma boa representação do comportamento do rio e, as métricas de desempenho para a estação foram consideradas muito satisfatórias, com os melhores valores da validação.



*Figura 27 – Hidrogramas observados e simulados no período de validação, na estação Campo Bom (87380000).*

A figura 28 apresenta os hidrogramas observado e simulado da estação fluviométrica São Leopoldo, de código 8738200. Neste ponto o hidrograma simulado apresenta subestimação dos picos em relação ao observado, apesar disso apresentou uma boa representação do comportamento do rio e, as métricas de desempenho para a estação foram consideradas muito satisfatórias.

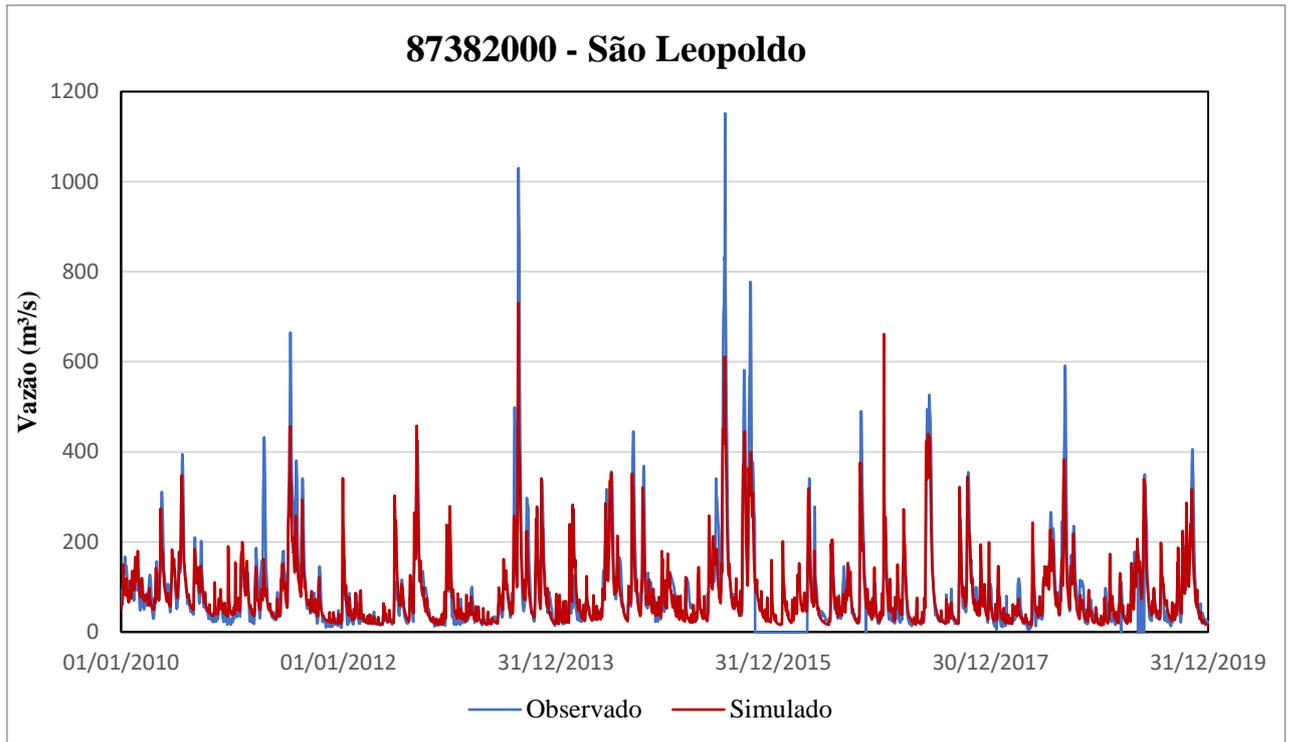


Figura 28 – Hidrogramas observados e simulados no período de validação, na estação São Leopoldo (87380000).

#### 5.1.2.2. MÉTRICAS

A tabela 17 apresenta os postos fluviométricos utilizados na validação do modelo hidrológico, de montante a jusante e os resultados das métricas de desempenho, Nash-Sutcliffe, Pearson e erro de volumes, para cada posto fluviométrico. A validação utilizou os mesmos postos da calibração e, os postos que possuem dados de sedimentos estão grifados na tabela.

Tabela 17 – Resumo dos resultados das métricas de desempenho para vazões simuladas, referente ao período de validação.

Valores das métricas para as vazões			
Estação	NASH	Pearson	$\Delta V$
<b>87374000</b>	0,680	0,838	6,50%
<b>87380000</b>	0,837	0,913	2,52%
87382000	0,742	0,877	9,81%

A partir da verificação dos resultados apresentados na tabela 16 com as faixas de desempenho da tabela 11, é possível afirmar que a validação gerou bons resultados para as três estações analisadas, com avaliação Boa ou Muito Boa em todas métricas de desempenho. A estação 87374000 foi a que apresentou os piores valores de Nash-Sutcliffe, porém ainda sendo consideradas com uma avaliação Boa. Nos coeficientes de Pearson e erro de volumes todas estações tiveram uma avaliação Muito Boa.

### 5.1.3. COMPARAÇÃO ENTRE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

A tabela 17 apresenta os valores das métricas de desempenho da calibração e validação do modelo hidrológico, MGB, para a bacia do rio dos Sinos, e apresenta a diferença absoluta entre os valores das métricas em cada estação. Estão destacados em vermelho se houve diminuição no valor da métrica, em azul se permaneceu constante e verde se houve aumento no valor da métrica na validação em relação a calibração.

*Tabela 18 – Comparação entre os valores das métricas de desempenho na calibração e validação.*

Estação	Calibração			Validação			Diferença		
	NASH	Pearson	$\Delta V$	NASH	Pearson	$\Delta V$	NASH	Pearson	$\Delta V$
<b>87374000</b>	0,677	0,837	9,2%	0,680	0,838	6,5%	<b>0,003</b>	<b>0,001</b>	<b>2,7%</b>
<b>87380000</b>	0,891	0,885	10,2%	0,837	0,913	2,5%	<b>-0,054</b>	<b>0,028</b>	<b>7,7%</b>
87382000	0,864	0,858	13,0%	0,742	0,877	9,8%	<b>-0,122</b>	<b>0,019</b>	<b>3,2%</b>

Com base nos valores da tabela 18 é possível concluir que o modelo apresentou pequenas variações nas métricas de desempenho, sendo elas, variações positivas na métrica do erro do volume ( $\Delta V$ ) e negativas no Nash-Sutcliffe (NASH). Os valores das métricas de desempenho oscilaram sempre acima da avaliação “Bom”, o dessa forma, é possível avaliar que o modelo hidrológico foi calibrado e validado de forma correta, se mostrando capaz de representar a dinâmica de vazões da bacia do Sinos de forma coerente e satisfatória.

## 5.2. MGB-SED

A seguir são apresentados os resultados gerados no modelo de sedimentos no período de calibração e validação na bacia do Sinos. Sendo inicialmente apresentados os parâmetros finais da equação MUSLE adotados nas simulações, os sedimentogramas resultantes da calibração e validação das estações Taquara Montante (87374000) e Campo Bom (87380000) e, no fim, a apresentação das respectivas métricas de desempenho para a concentração de sedimentos em suspensão e descarga sólida em suspensão simulados no modelo.

### 5.2.1. PARÂMETROS FINAIS MUSLE

As concentrações finais de areia, silte e argila, bem como, os valores finais dos fatores de erodibilidade (K) e uso e ocupação solo (C) encontram-se nas tabelas 19 para as sub-bacias 1 e 6, tabela 20 para as sub-bacias 2 e 4 e tabela 21 para as sub-bacias 3 e 5.

Tabela 19 – Valores utilizados nos parâmetros calibráveis do modelo de sedimentos MGB-SED para as sub-bacias 1 e 6.

<b>Sub-bacias 1 e 6</b>						
Uso	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	Rocha %	C
Floresta rasa	40,50	14,50	45,00	2,50	0,02	0,001
Floresta profunda	42,40	12,60	45,00	2,50	0,01	0,001
Agricultura rasa	48,00	12,00	40,00	1,40	0,05	0,002
Agricultura profunda	50,90	10,50	38,60	1,00	0,04	0,002
Campo raso	41,00	14,00	45,00	0,80	0,06	0,015
Campo profundo	51,90	11,60	36,50	0,70	0,14	0,015
Várzea	44,00	18,00	38,00	3,00	0,00	0,100
Área impermeável	48,00	18,00	30,00	0,80	0,01	0,001
Água	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000

Tabela 20 – Valores utilizados nos parâmetros calibráveis do modelo de sedimentos MGB-SED para as sub-bacias 2 e 4.

<b>Sub-bacias 2 e 4</b>						
Uso	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	Rocha %	C
Floresta rasa	76,60	10,30	13,10	0,46	0,02	0,004
Floresta profunda	68,90	7,50	23,40	0,24	0,01	0,004
Agricultura rasa	76,60	10,30	13,10	0,46	0,05	0,150
Agricultura profunda	68,90	7,50	23,40	0,24	0,04	0,250
Campo raso	76,60	10,30	13,10	0,46	0,06	0,022
Campo profundo	68,90	7,50	23,40	0,24	0,14	0,022
Várzea	25,70	21,30	53,00	1,93	0,00	0,000
Área impermeável	43,30	22,20	34,50	1,74	0,01	0,001
Água	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000

Tabela 21 – Valores utilizados nos parâmetros calibráveis do modelo de sedimentos MGB-SED para as sub-bacias 3 e 5.

<b>Sub-bacias 3 e 5</b>						
Uso	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	Rocha %	C
Floresta rasa	40,50	14,50	45,00	2,50	0,02	0,170
Floresta profunda	45,40	13,60	41,00	2,50	0,01	0,170
Agricultura rasa	40,00	15,00	45,00	1,40	0,05	0,190
Agricultura profunda	42,90	13,50	43,60	1,00	0,04	0,190
Campo raso	45,00	15,00	40,00	0,80	0,06	0,190
Campo profundo	42,90	13,50	43,60	0,70	0,14	0,150
Várzea	44,00	18,00	38,00	3,00	0,00	0,100
Área impermeável	48,00	18,00	30,00	0,80	0,01	0,001
Água	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000

## 5.2.2. CALIBRAÇÃO

Nos próximos itens são apresentados, em formato de sedimentogramas e tabela com as métricas de desempenho, os resultados referentes as descargas sólidas em suspensão simuladas para o período de calibração, entre 01/01/2010 e 01/01/2019.

### 5.2.2.1. SEDIMENTOGRAMAS

A seguir são apresentados os sedimentogramas das descargas sólidas observada e simulada, referentes aos dois postos fluviométricos com dados de sedimentos na bacia. Os sedimentogramas serão apresentados do mais montante para o mais a jusante da bacia, sendo assim: Taquara Montante (87374000) e Campo Bom (87380000).

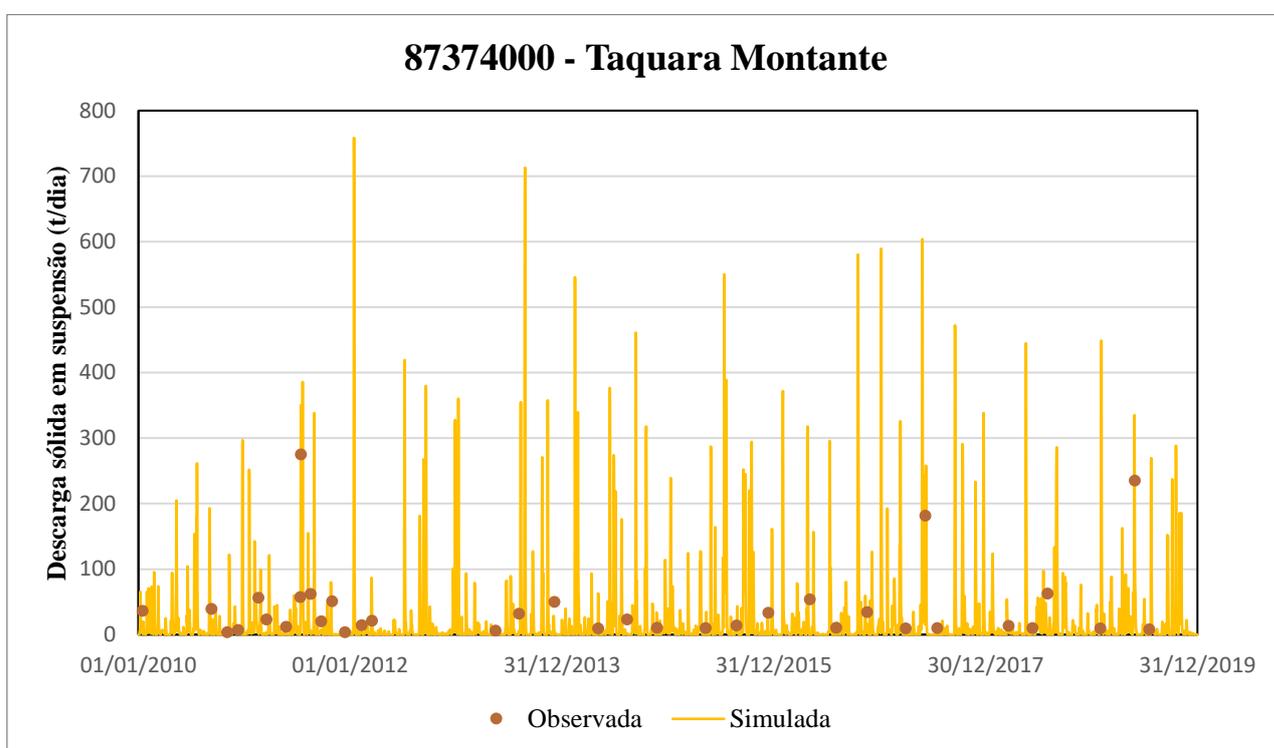
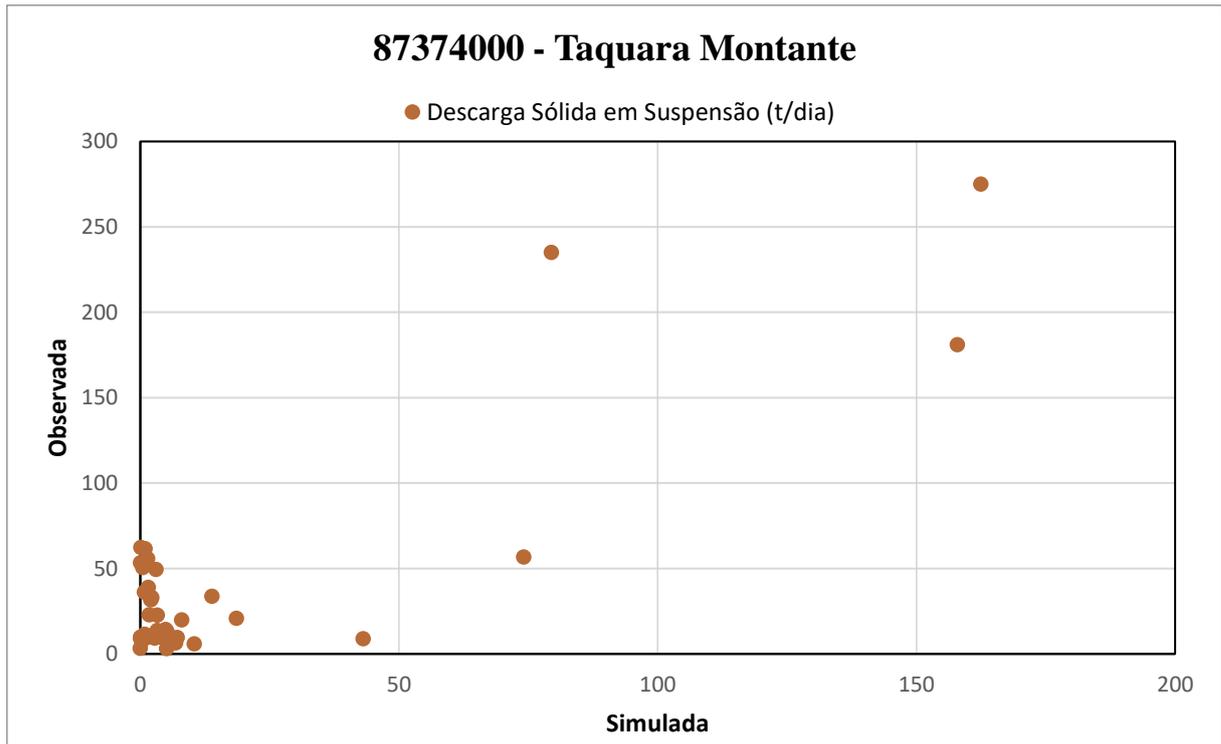


Figura 29 – Descarga sólida em suspensão simulada e observada no período de calibração, na estação Taquara Montante (87374000).



*Figura 30 - Descarga sólida em suspensão observada pela simulada no período de calibração, na estação Taquara Montante (87374000).*

A figura 29 apresenta os dados de descarga sólida em suspensão observada (pontos) e simulada, os dados apresentam boa correlação visual, com valores observados próximos dos simulados, os picos dos dados simulados apresentaram valores muito maiores que os observados, em virtude da medição ser realizada em campanhas. A figura 30 apresenta o gráfico dos dados da descarga sólida em suspensão observadas pelos simulada, sendo perceptível um agrupamento por parte dos dados nos valores entre 0 a 50 t/dia, com os valores observados sendo ligeiramente superiores aos valores simulados.

A descarga sólida em suspensão simulada e observada na estação Campo Bom, figura 31, apresenta boa correlação visual, porém os dois dados acima de 3000 t/dia estão distantes de valores simulados. É possível notar o grande pico no dia 26/08/2013, com alto valor de descarga sólida em suspensão simulada, 29693 t/dia, isso se deve ao fato do modelo hidrológico ter superestimado o pico de cheia neste dia, gerando pico de 762 m<sup>3</sup>/s. A figura 32 apresenta o gráfico dos dados da descarga sólida em suspensão observadas pelos simulada da estação Campo Bom, sendo perceptível que os dados observados acima de 2000 t/dia não apresentam boa correlação com dados simulados, ainda se nota certa correlação entre dados observados e simulados, com valores abaixo de 1000 t/dia.

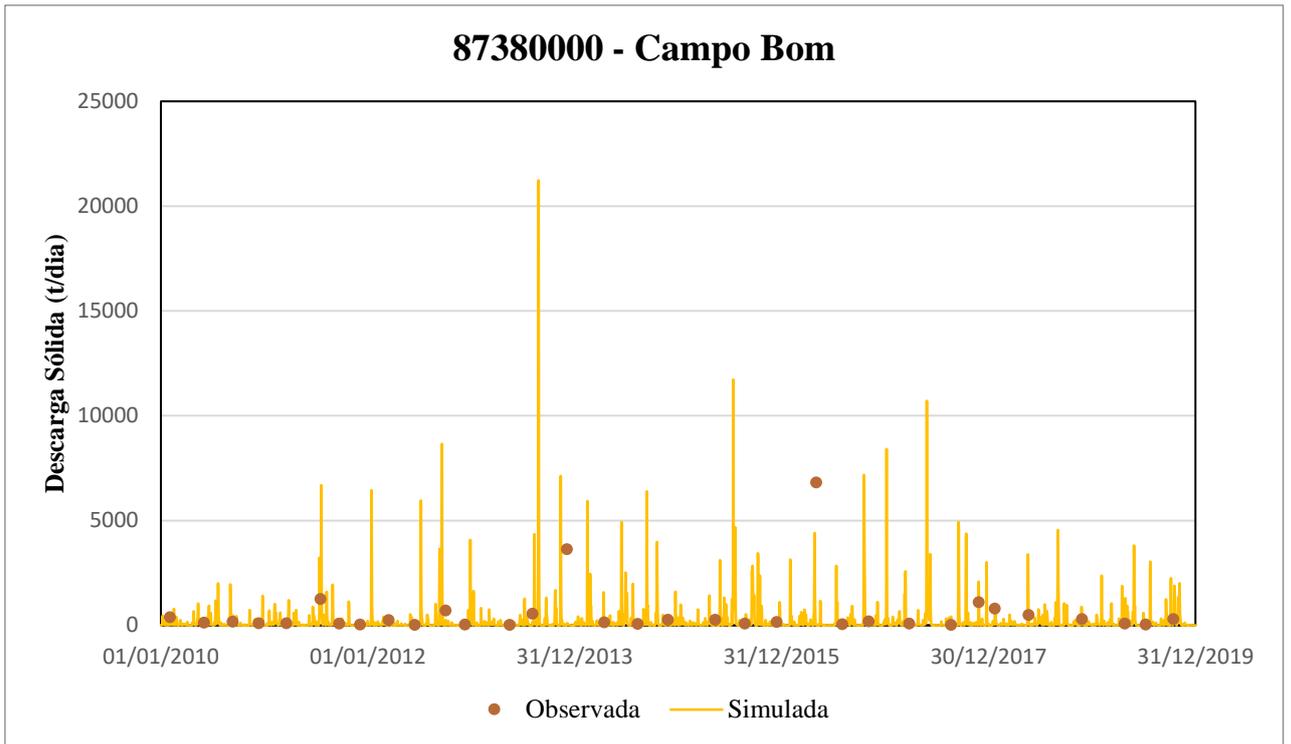


Figura 31 - Descarga sólida em suspensão simulada e observada no período de calibração, na estação Campo Bom (87380000).

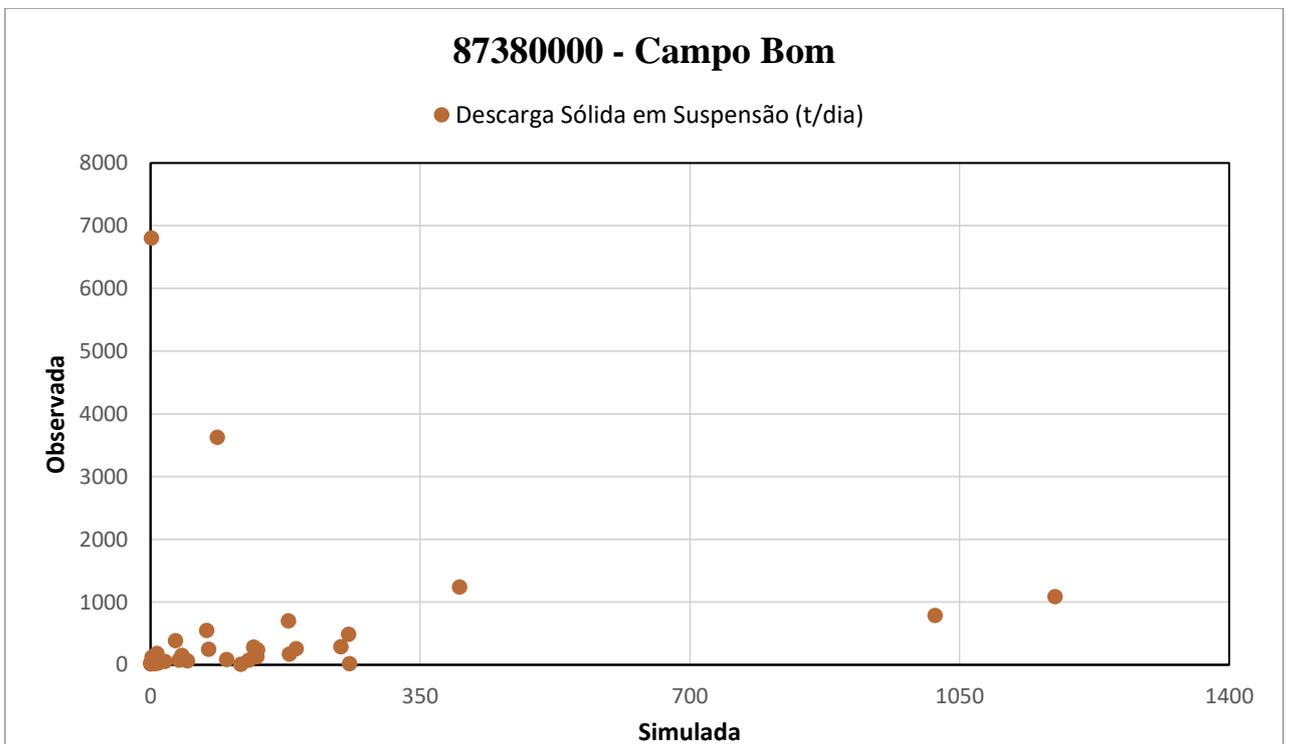


Figura 32 - Descarga sólida em suspensão observada pela simulada no período de calibração, na estação Campo Bom (87380000).

### 5.2.2.2. MÉTRICAS

A tabela 22 apresenta os postos fluviométricos utilizados na calibração do modelo de sedimentos, de montante a jusante e os resultados das métricas de desempenho, Nash-Sutcliffe, Correlação de Pearson e erro de volumes ( $\Delta V$ ), para cada posto fluviométrico, foi adicionada uma coluna com as métricas de desempenho da estação Campo Bom (87380000), porém sem os dois dados acima de 3000 t/dia mg/L, que foram considerados possivelmente espúrios, sendo a estação representada com o código seguido de um asterisco, esse análise vai ser apresentada dessa foram na sequência dos resultados.

*Tabela 22 - Resumo dos resultados das métricas de desempenho para a descarga sólida em suspensão simulada, referente ao período de calibração, o asterisco identifica a estação sem os dados possivelmente espúrios.*

Calibração Qss			
	87374000	87380000	87380000**
NASH	0,513	-0,115	0,444
Pearson	0,847	0,059	0,742
$\Delta V$	58,7%	72,2%	36,9%

A partir da análise dos resultados apresentados na tabela 22 com as faixas de desempenho da tabela 11, é possível afirmar que calibração para descarga sólida em suspensão apresentou resultados bons e, muito bons nas avaliações das métricas de desempenho para a estação Taquara Montante e para a estação Campo Bom sem dados possivelmente espúrios. A calibração obteve valores de Nash-Sutcliffe e Pearson muito bons para ambas estações e valores satisfatórios e bons para o erro de volumes.

### 5.2.3. VALIDAÇÃO

Nos próximos itens são apresentados, em formato de sedimentogramas e tabela com as métricas de desempenho, os resultados referentes a descarga sólida em suspensão observada e simuladas para o período de validação, entre 01/01/1997 e 31/12/2006. Como medição de sedimentos na estação Taquara Montante começou a ser realizada em 2009, a mesma não possui dados fora do período de calibração, dessa forma, a validação foi realizada apenas com dados da estação Campo Bom.

#### 5.2.3.1. SEDIMENTOGRAMAS

A figura 33 apresenta os dados de descargas sólidas simuladas e observadas na estação Campo Bom para o período de validação, os dados apresentam boa correlação visual com apenas os dois dados acima 5000 t/dia distantes dos dados simulados no período, sendo o dado do dia 28/10/2004, em torno de 25000 t/dia distante de qualquer pico simulado, sendo

possivelmente espúrio, dessa forma, foi gerado um novo gráfico sem este dado, figura 34, onde é possível observar a boa correlação visual entre os dados observados e simulados.

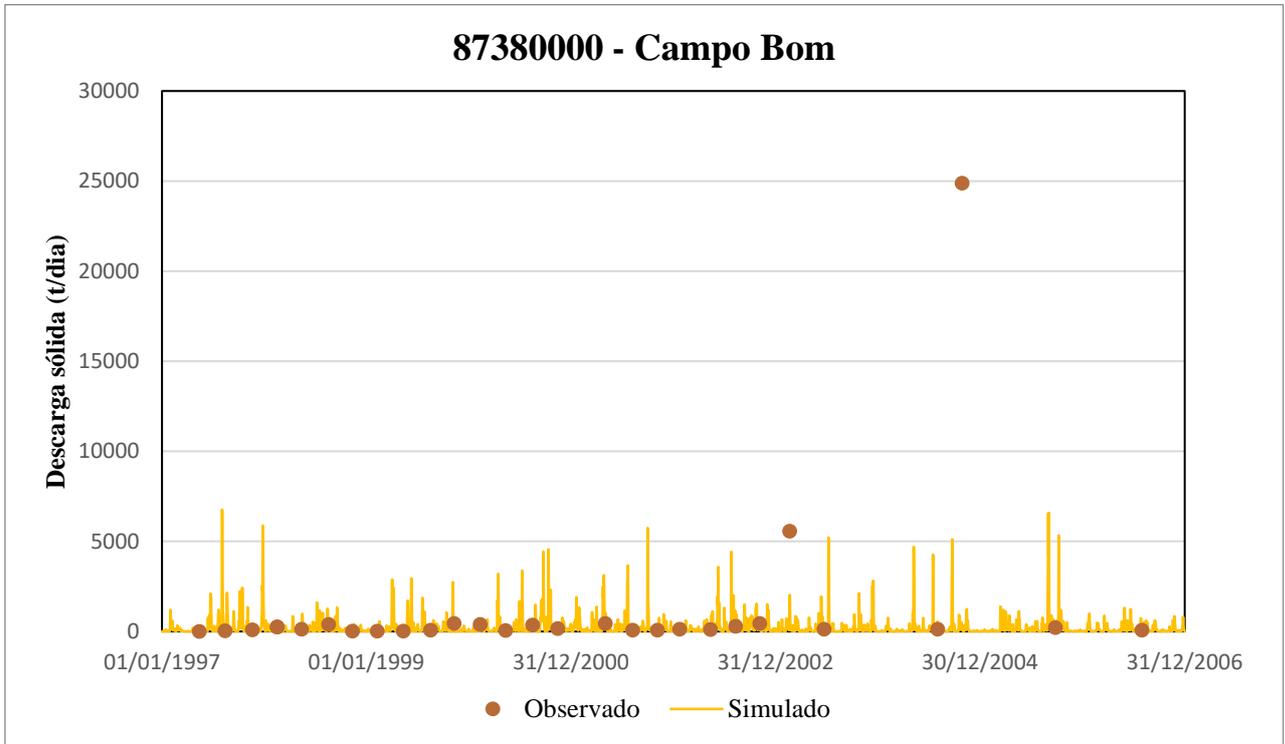


Figura 33 – Descarga sólida em suspensão simulada e observada no período de validação, na estação Campo Bom (87380000).

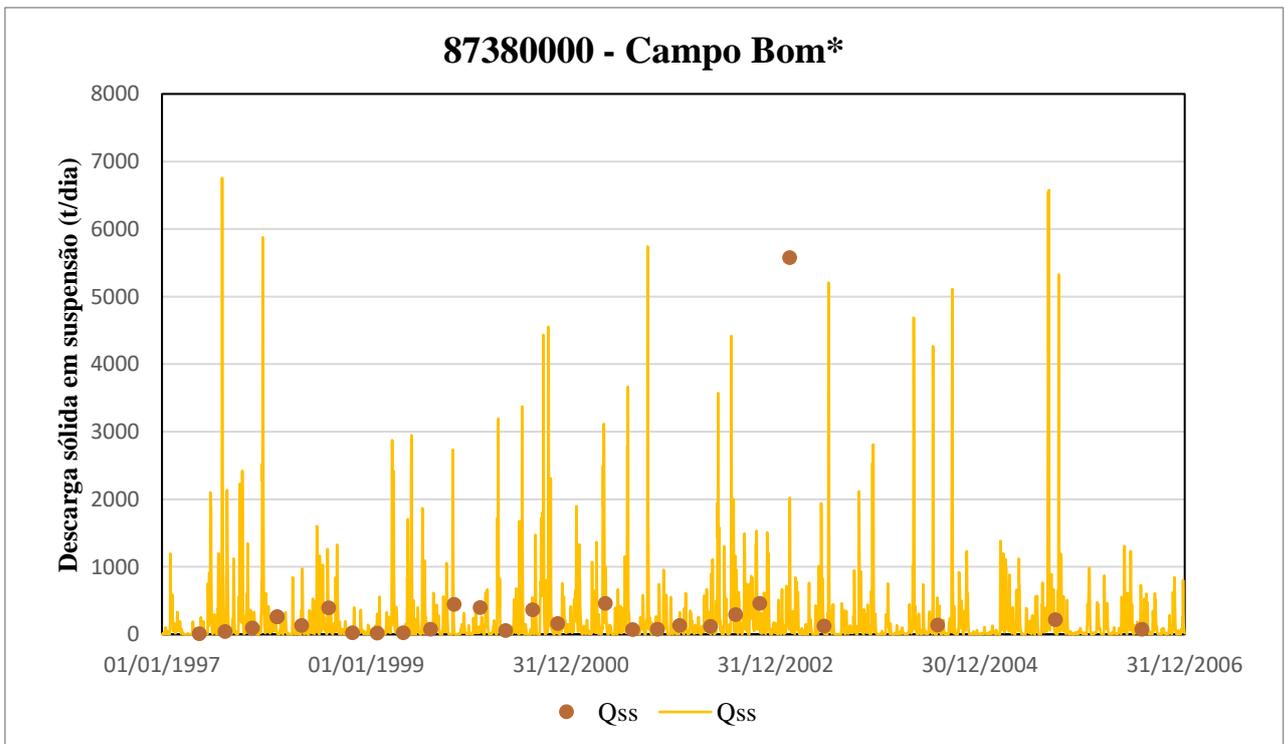
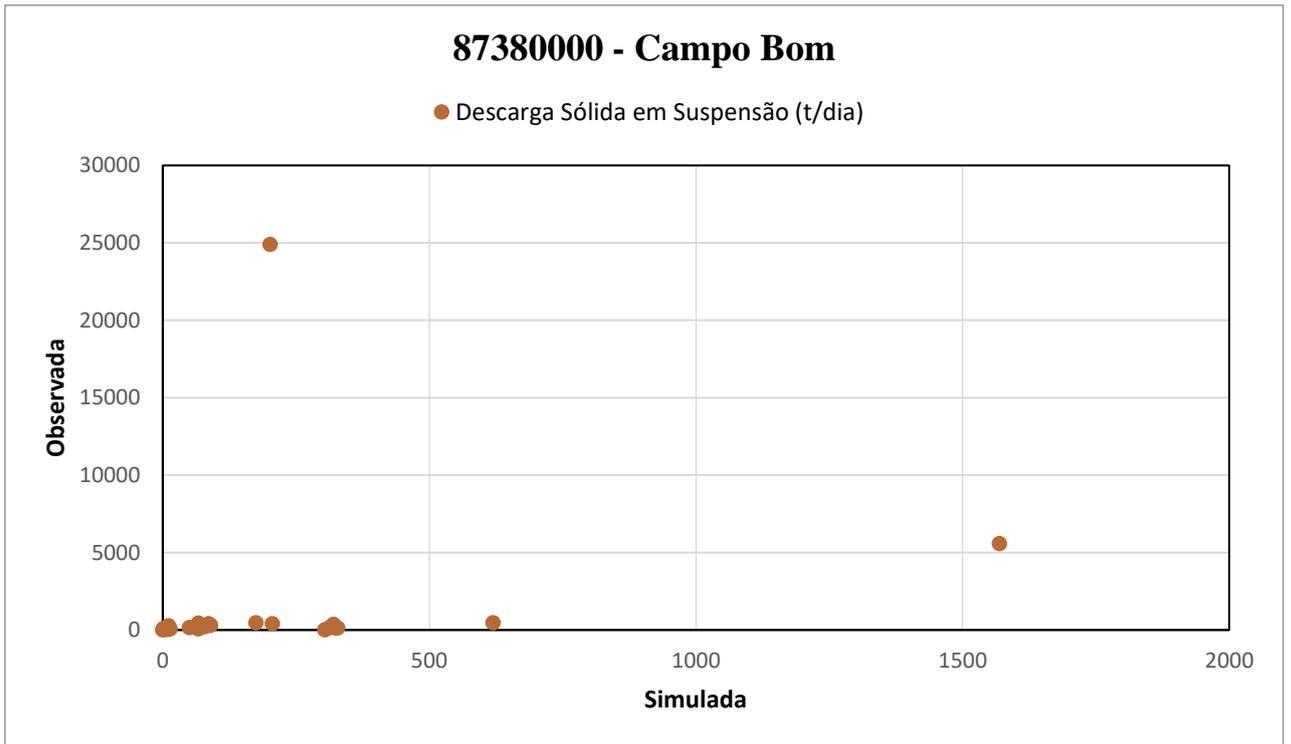
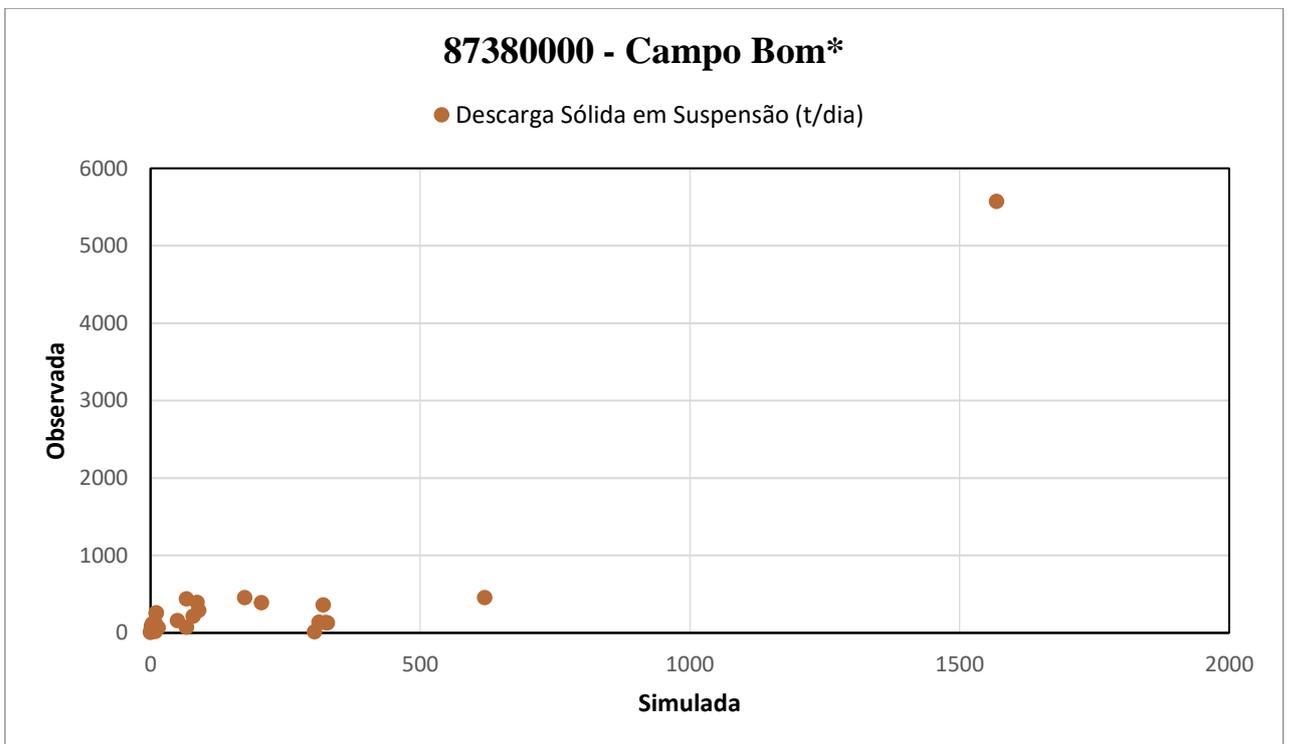


Figura 34 – Descarga sólida em suspensão simulada e observada no período de validação, na estação Campo Bom (87380000) sem o dado considerado espúrio.



*Figura 35 - Descarga sólida em suspensão observada pela simulada no período de validação, na estação Campo Bom (87380000).*



*Figura 36 - Descarga sólida em suspensão observada pela simulada no período de validação, na estação Campo Bom (87380000) sem o dado considerado espúrio.*

As figuras 35 e 36 apresentam, os dados observados pelos simulados da estação Campo Bom considerando, respectivamente, todos os dados e, não considerando o valor observado mais extremo (~25000 t/dia), em ambas figuras se nota que os valores simulados abaixo de 500

(t/dia) apresentam certa correlação com dados observado, com exceção do maior valor observado, à medida que ocorre aumento nos valores a correlação diminui.

#### 5.2.3.2. MÉTRICAS

A tabela 23 apresenta os valores das métricas de desempenho, Nash-Sutcliffe, Correlação de Pearson e erro de volumes ( $\Delta V$ ), para o período utilizado na validação, utilizando os dados observados da estação Campo Bom (87380000) e, da versão da estação sem o dado de concentração de descarga sólida em suspensão de 25000 t/dia, tal como, realizado anteriormente a estação é identificada como 87380000\*.

*Tabela 23 – Resumo dos resultados das métricas de desempenho para a descarga sólida em suspensão simulada, referente ao período de validação, o asterisco identifica a estação sem o dado possivelmente espúrio.*

Validação Qss		
	87380000	87380000*
NASH	0,034	0,464
Pearson	0,214	0,894
$\Delta V$	86,2%	55,1%

A partir da análise dos resultados apresentados na tabela 23 com as faixas de desempenho da tabela 11, é possível afirmar que validação gerou apresentou resultados bons em todas as métricas de desempenhos na estação 87380000\*, enquanto na estação 87380000 o resultado foi insatisfatório.

Considerando os resultados da validação da estação 87380000\* o modelo apresentou variações nas métricas de desempenho, porém acima dos valores considerados satisfatórios e bons, dessa forma, é possível afirmar que o modelo de sedimentos foi calibrado e validado de forma a representar de forma aceitável o comportamento da descarga sólida em suspensão com discretização diária na bacia do rio dos Sinos.

### 5.3. MGB-SEDmm

Nos itens a seguir são apresentados os resultados obtidos nas simulações do MGB-SEDmm na bacia do rio dos Sinos. Inicialmente serão apresentados os gatilhos e multiplicadores utilizados em cada simulação, os sedimentogramas de descarga sólida em suspensão resultantes dessas simulações nas estações Taquara Montante (87374000) e Campo Bom (87380000) e, por fim, são apresentadas as métricas de desempenho da descarga sólida em suspensão simuladas e observadas nas estações supracitadas. Serão apresentadas apenas as simulações com variações mais representativas, as demais serão apresentadas no apêndice I.

### 5.3.1. GATILHOS E MULTIPLICADORES TESTADOS

As variações dos gatilhos, pluviométrico diário e LS acumulado, e do multiplicador do cálculo da MUSLE utilizadas nas simulações se encontram na tabela 24. Foram realizadas 19 simulações no MGB-SEDmm, com 4 variações no gatilho pluviométrico (Plu), 5 variações no gatilho do fator LS acumulado (LSAcu) e 4 variações no multiplicador (Multi).

*Tabela 24 – Conjunto de testes com as variações de cada gatilho e multiplicador.*

Testes	Gatilhos		
	Plu	LSAcu	Multi
1	0	0	1
2	60	110000	10
3	80	110000	10
4	100	110000	10
5	60	100000	10
6	60	90000	10
7	60	80000	10
8	80	100000	10
9	80	90000	10
10	80	80000	10
11	100	100000	10
12	100	90000	10
13	100	80000	10
14	60	80000	15
15	60	80000	20
16	80	80000	15
17	80	80000	20
18	100	80000	15
19	100	80000	20

### 5.3.2. MGB-SED X MGB-SEDmm

A primeira simulação utilizou os valores dos gatilhos zerados e o multiplicador em 1, para testar possíveis diferenças das simulações no MGB-SEDmm em relação ao MGB-SED. As figuras 37 e 38 apresentam as descargas sólidas simuladas no MGB-SED, MGB-SEDmm e observado, sendo visível que ambas simulações apresentam resultados iguais. Dessa forma é possível afirmar que as modificações realizadas no código do MGB-SED, para criação do

MGB-SEDmm, não transcorrem em mudanças nos resultados em casos onde se deseja rodar o MGB-SED.

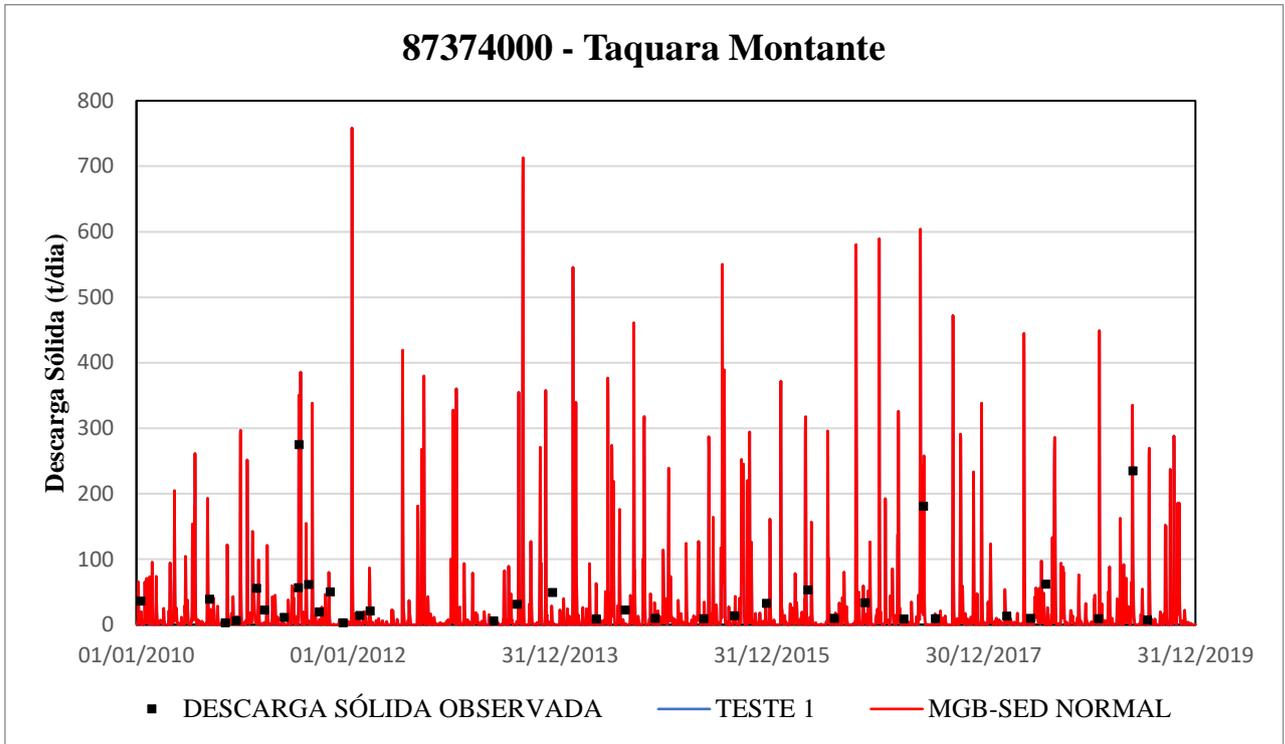


Figura 37 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED, MEGB-SEDmm no período de estudo, na estação Taquara Montante (87374000).

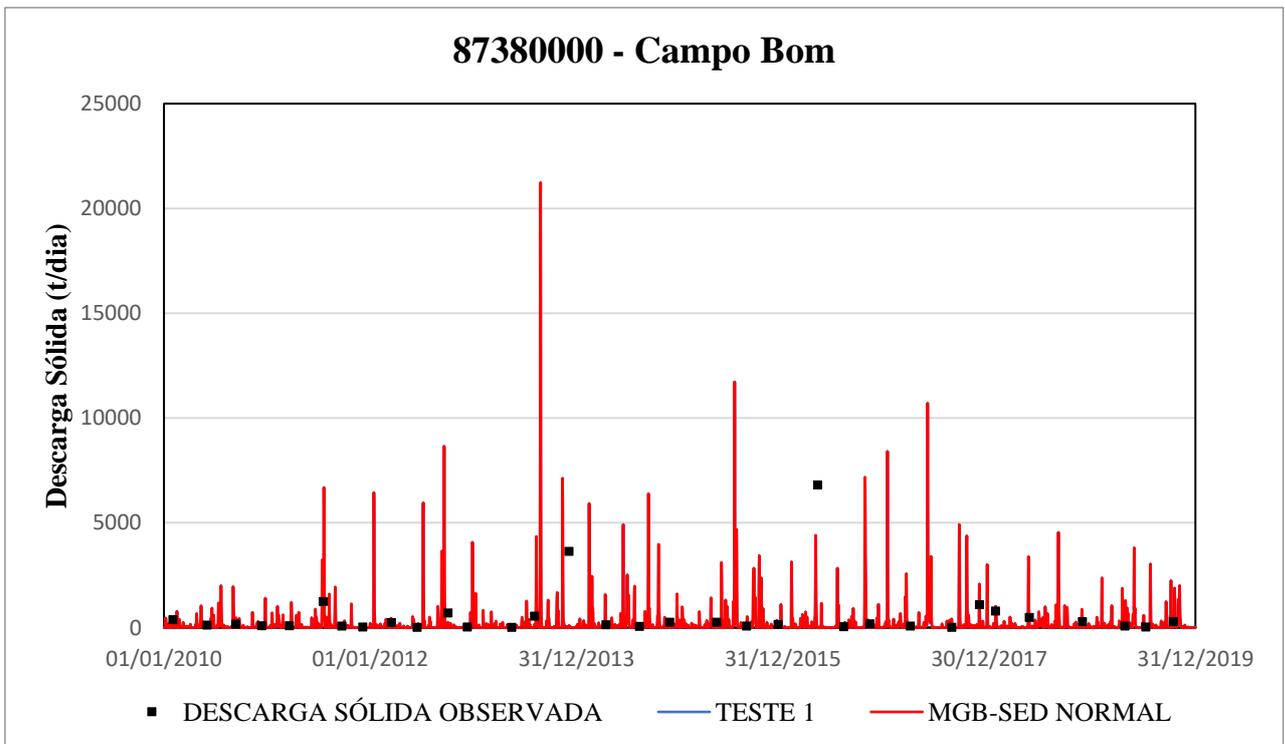
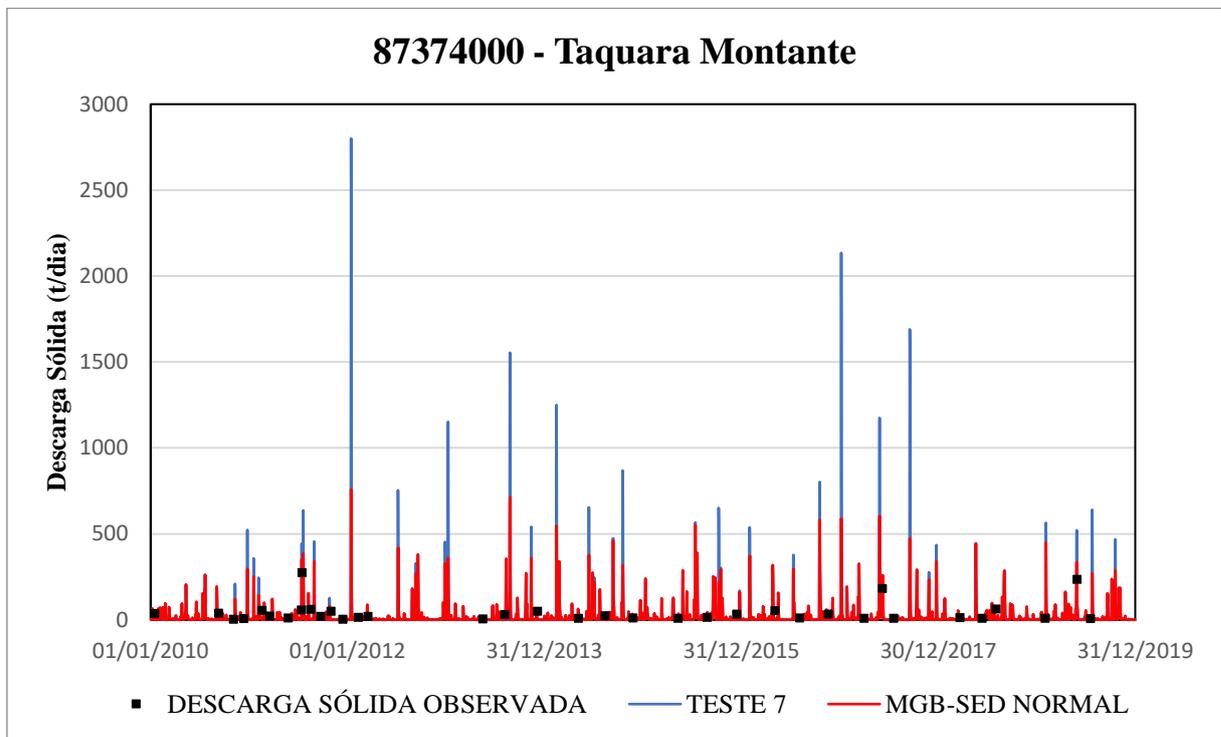


Figura 38 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED, MEGB-SEDmm no período de estudo, na estação Campo Bom (87380000).

### 5.3.3. GATILHO PLUVIOMÉTRICO

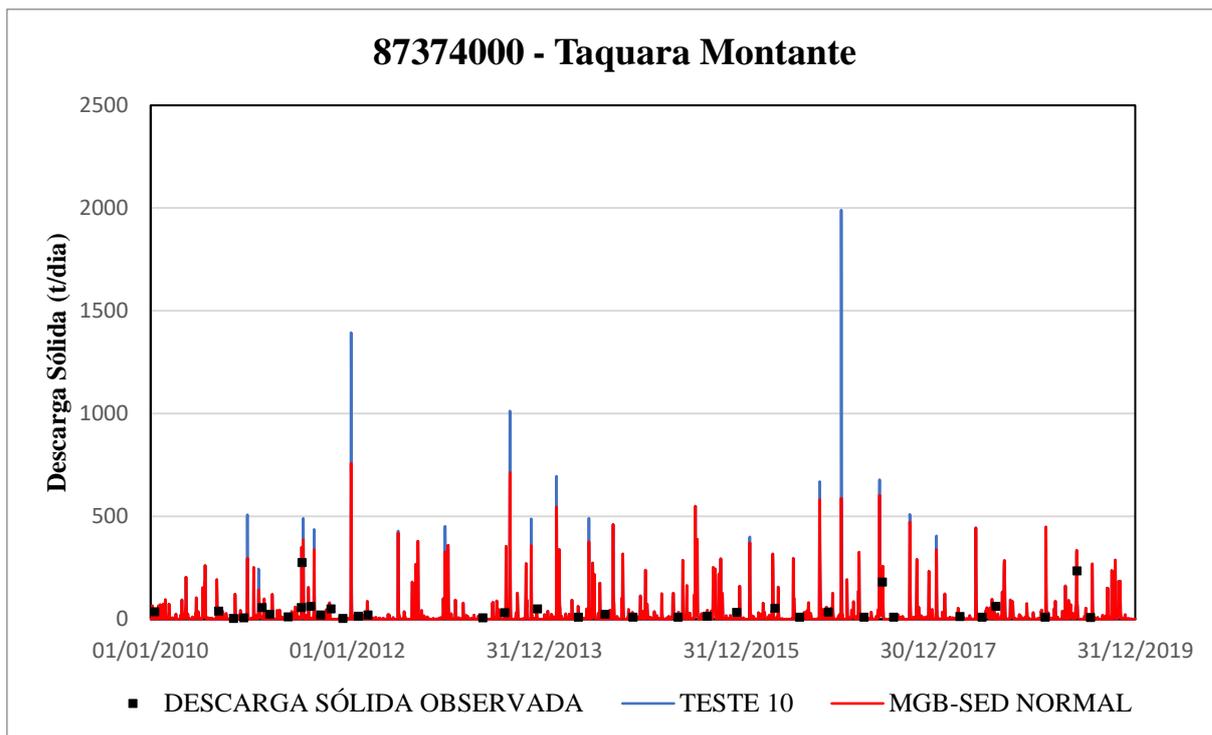
Neste item são apresentados em formato de sedimentogramas de descarga sólida em suspensão e tabelas com as métricas de desempenho, os resultados referentes as descargas sólidas observadas e simuladas nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm, para o período entre 01/01/2010 e 01/01/2019.

As figuras 39 a 41 apresentam a descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm na estação Taquara Montante (87374000), resultantes das simulações 7, 10 e 13. Neste conjunto de simulações o MGB-SEDmm foi definido fixo no gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador igual a 10, sendo assim foi variado o gatilho pluviométrico, sendo maior que 60 (figura 39), maior que 80 (figura 40) e maior que 100 (figura 41).



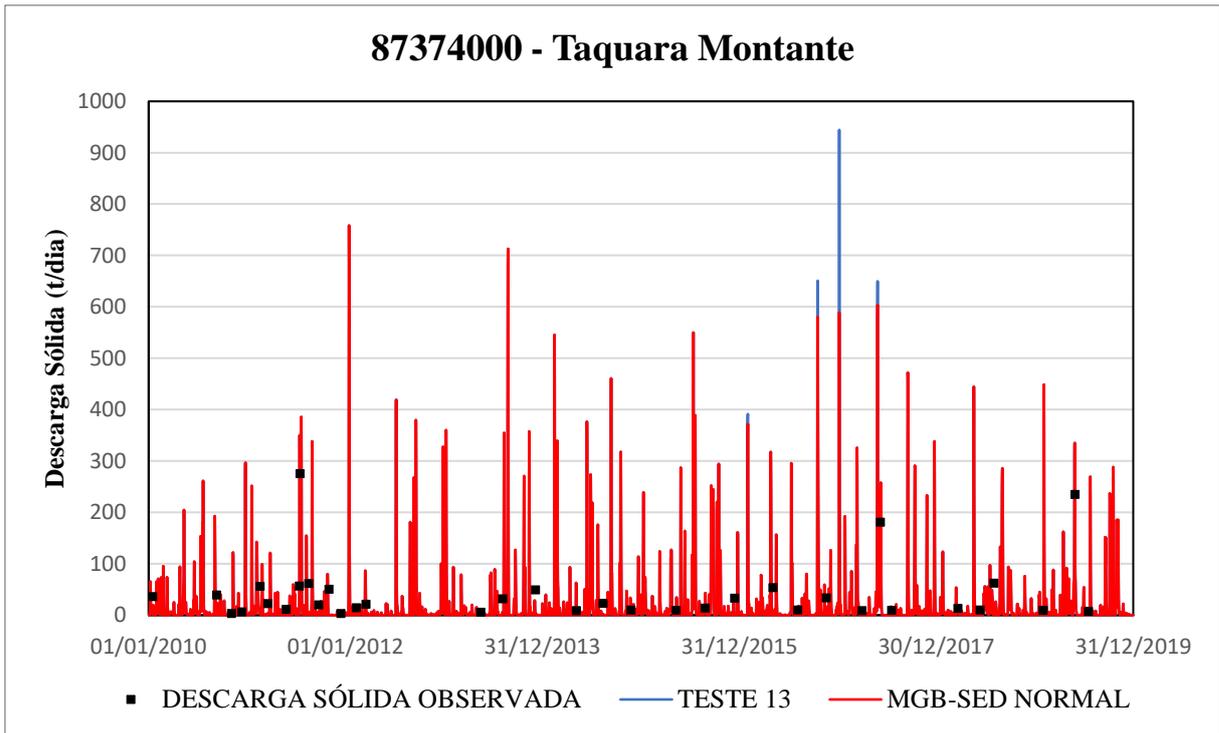
*Figura 39 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 60 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante (87374000).*

Os resultados obtidos com os menores valores simulados nos gatilhos ( $Plu > 60$  mm e  $LS$  acumulado  $> 80000$ ), figura 35 apresenta aumento em, praticamente, todos nos picos, com os maiores registrando mais de 3,5 vezes o valor simulado anteriormente no MGB-SED.



*Figura 40 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 80 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante (87374000).*

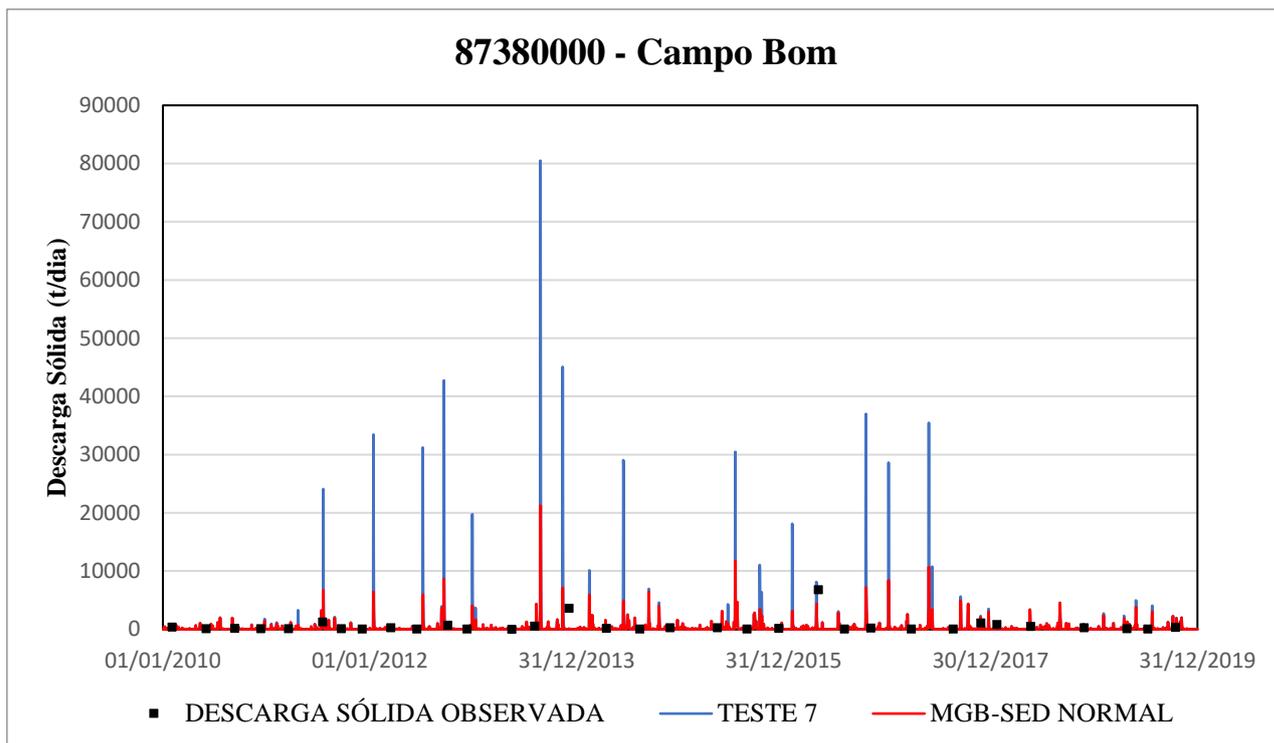
Com o valor intermediário do gatilho pluviométrico (>80 mm) é notada a diminuição dos valores atingidos pelos picos simulados de descarga sólida em suspensão em comparação a simulação anterior, sendo que, o maior valor atingido é de 1990 t/dia, justamente no dia correspondente ao evento de movimentos de massa em Rolante-RS, 05/01/2017.



*Figura 41 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante (87374000).*

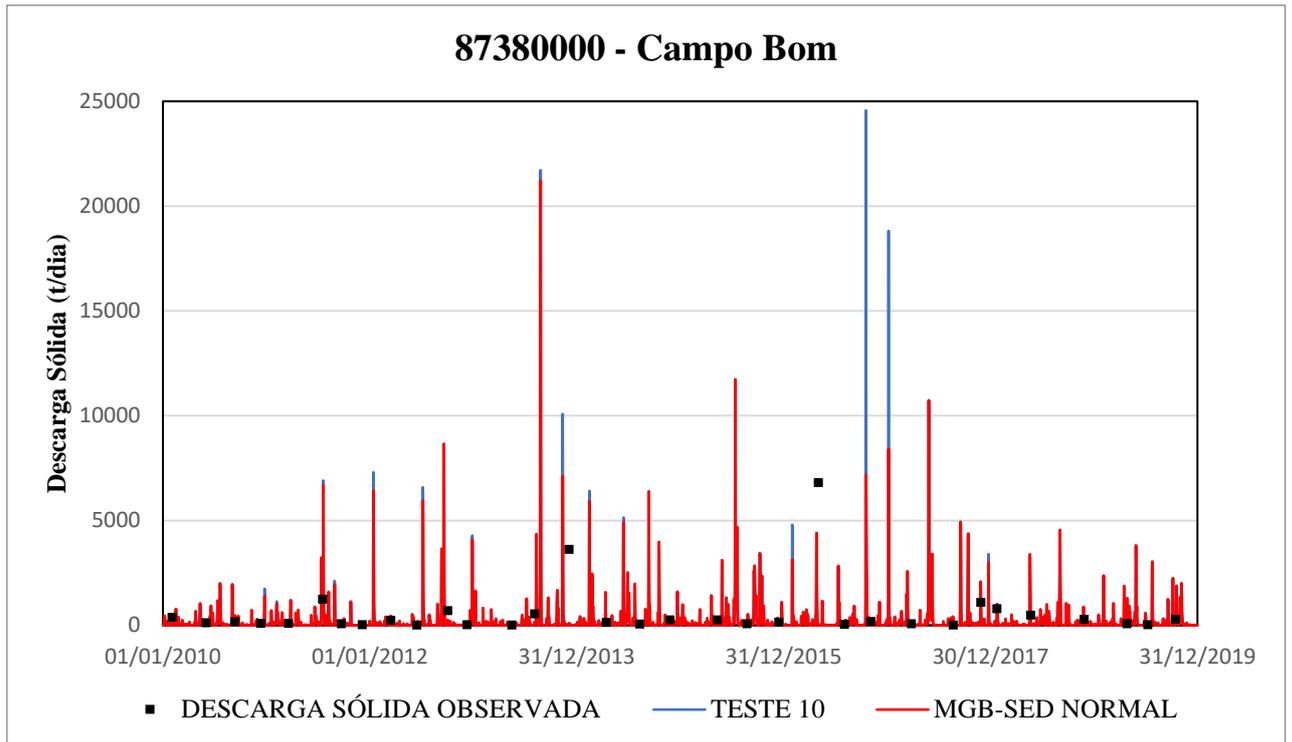
Por fim, utilizando o maior valor no simulado no gatilho pluviométrico ( $>100$  mm), figura 41, foi observada uma grande variação no valor atingido pelo maior pico, 944 t/dia, sendo novamente o pico do dia 05/01/217, os demais picos voltaram aos patamares atingidos com o MGB-SED, com exceção de três que tiveram pequeno aumento no em seus valores, entre 20 a 50 t/dia.

As figuras 42 a 44 apresentam a descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm na estação Campo Bom (8738000), resultantes das simulações 7, 10 e 13, com gatilhos comentados anteriormente.



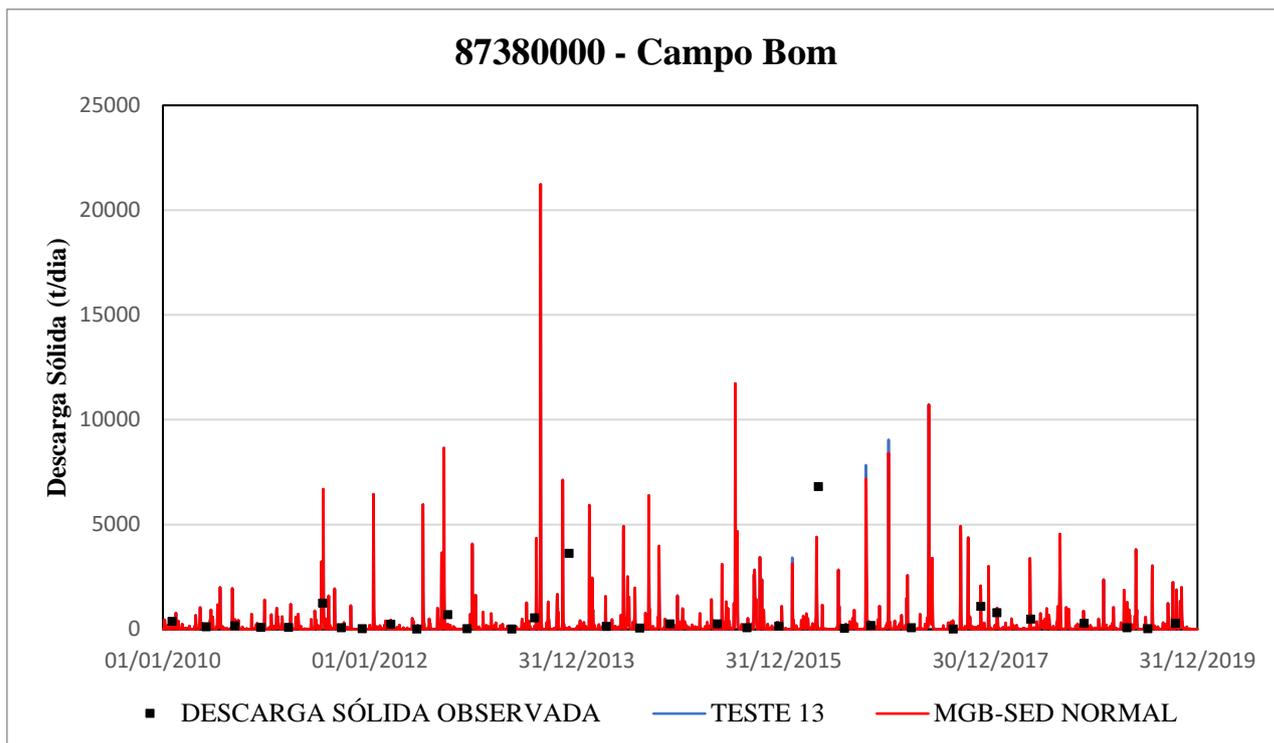
*Figura 42 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 60 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom (8738000).*

A figura 42 apresenta os resultados obtidos com os menores valores nos gatilhos ( $Plu > 60$  mm e  $L_{sacumulado} > 80000$ ) e, assim como na estação Taquara Montante ocorreu um aumento generalizado dos valores simulados, com os picos registrando mais de 6 vezes o valor simulado anteriormente no MGB-SED.



*Figura 43 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 80 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 800000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom (8738000).*

Assim como na estação anterior, com o valor intermediário do gatilho pluviométrico (>80 mm) ocorre, uma grande diminuição do número de picos alterados e nos valores atingidos pelos picos simulados de descarga sólida em suspensão, sendo que, na descarga sólida em suspensão o maior pico passa a ser o pico do dia 17/10/2016, demonstrando maior influência da sub-bacia 3 e 5 do que das sub-bacias 1 e 6 que formam a estação Taquara Montante.



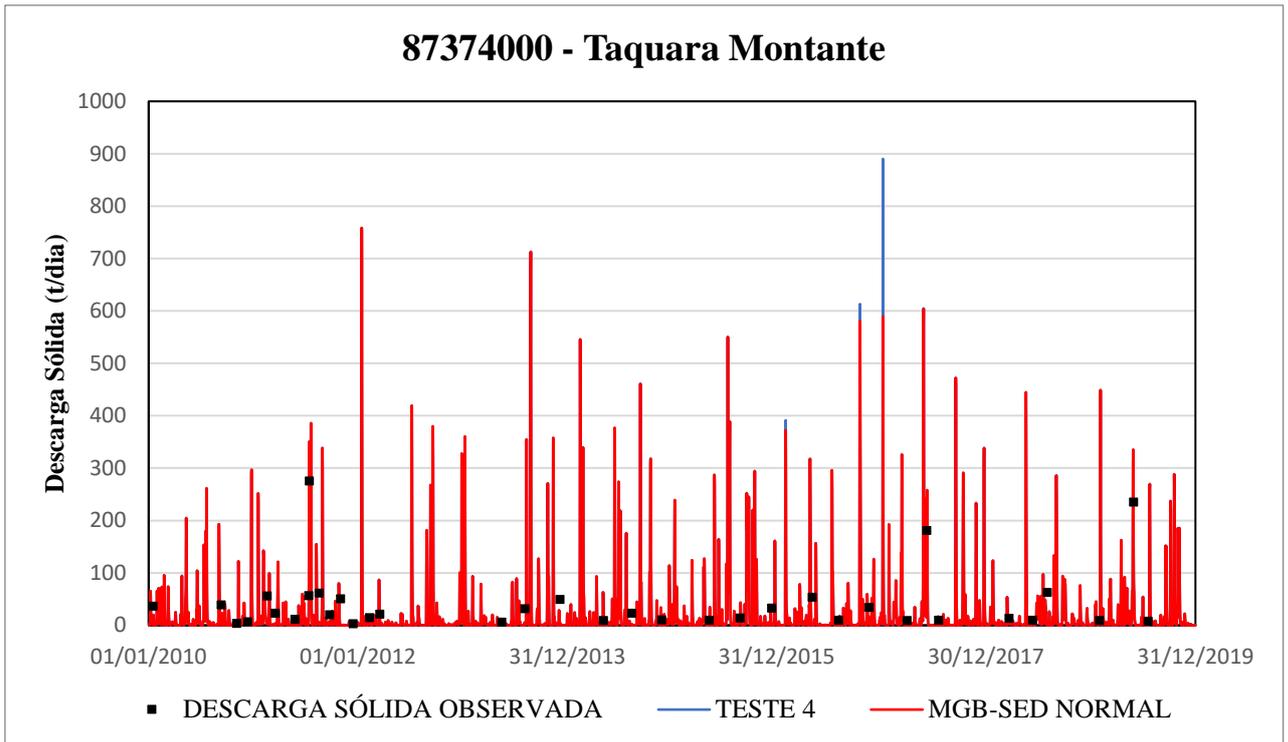
*Figura 44 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom (8738000).*

Utilizando o gatilho pluviométrico mais restritivo (>100 mm), figura 44, foi observada uma pequena variação nos valores de descarga sólida em suspensão, em comparação ao simulado com o MGB-SED. A variação foi de aproximadamente 500 t/dia em 2 picos.

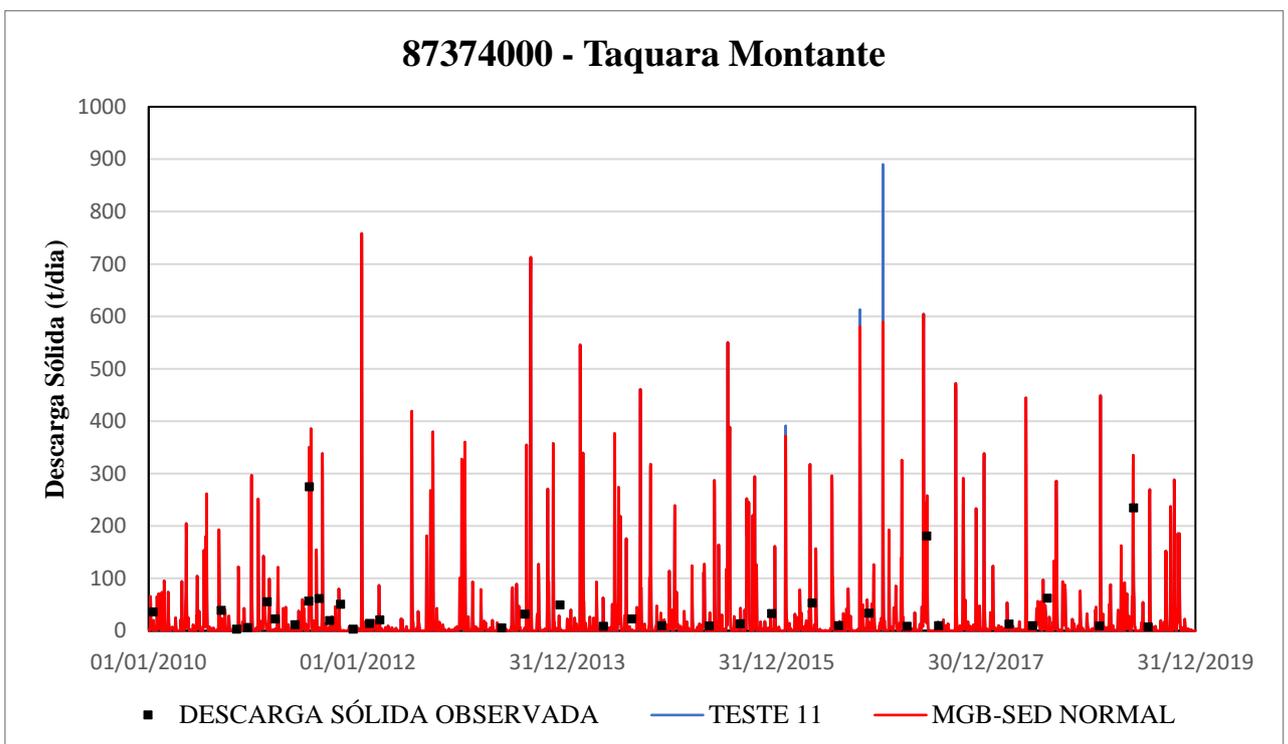
#### 5.3.4. GATILHO FATOR LS ACUMULADO

As figuras 44 a 47 apresentam a descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm na estação Taquara Montante (87374000), resultantes das simulações 4 (apresentada anteriormente), 11, 12 e 13. Neste conjunto de simulações o MGB-SEDmm foi definido fixo no gatilho do fator pluviométrico que 100 e multiplicador igual a 10, sendo assim foi variado o gatilho do fator LS acumulado (LSAcu), sendo maior que 110000 (figura 44), maior que 100000 (figura 43), maior que 90000 (figura 44) e maior 80000 (figura 47).

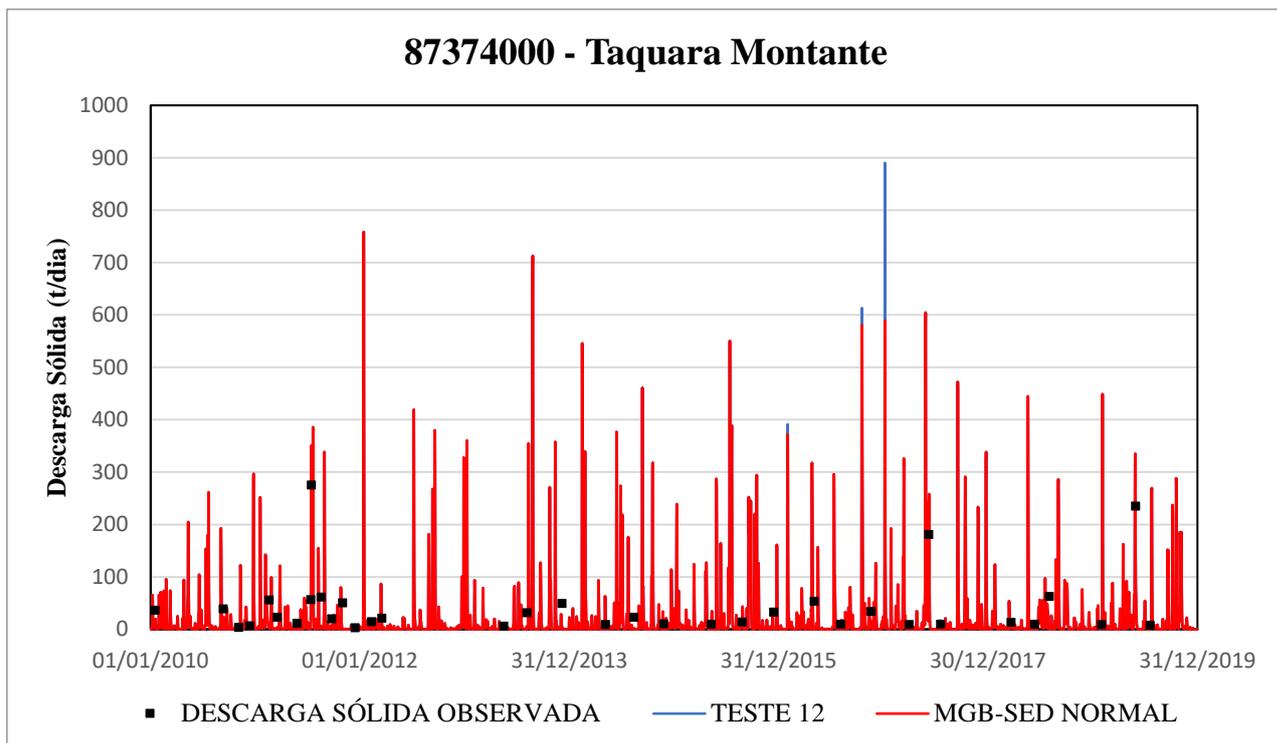
Os resultados obtidos com o gatilho do fator LS acumulado mais restritivo (>110000), apresentam pequenas variações de descarga sólida em suspensão, sendo um acréscimo considerável em apenas um pico simulado, o do dia 05/01/2017, sendo 50% superior ao simulado anteriormente, nos demais 2 picos a variação não foi superior a 10%.



*Figura 45 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 110000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante (87374000).*



*Figura 46 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 100000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante (87374000).*

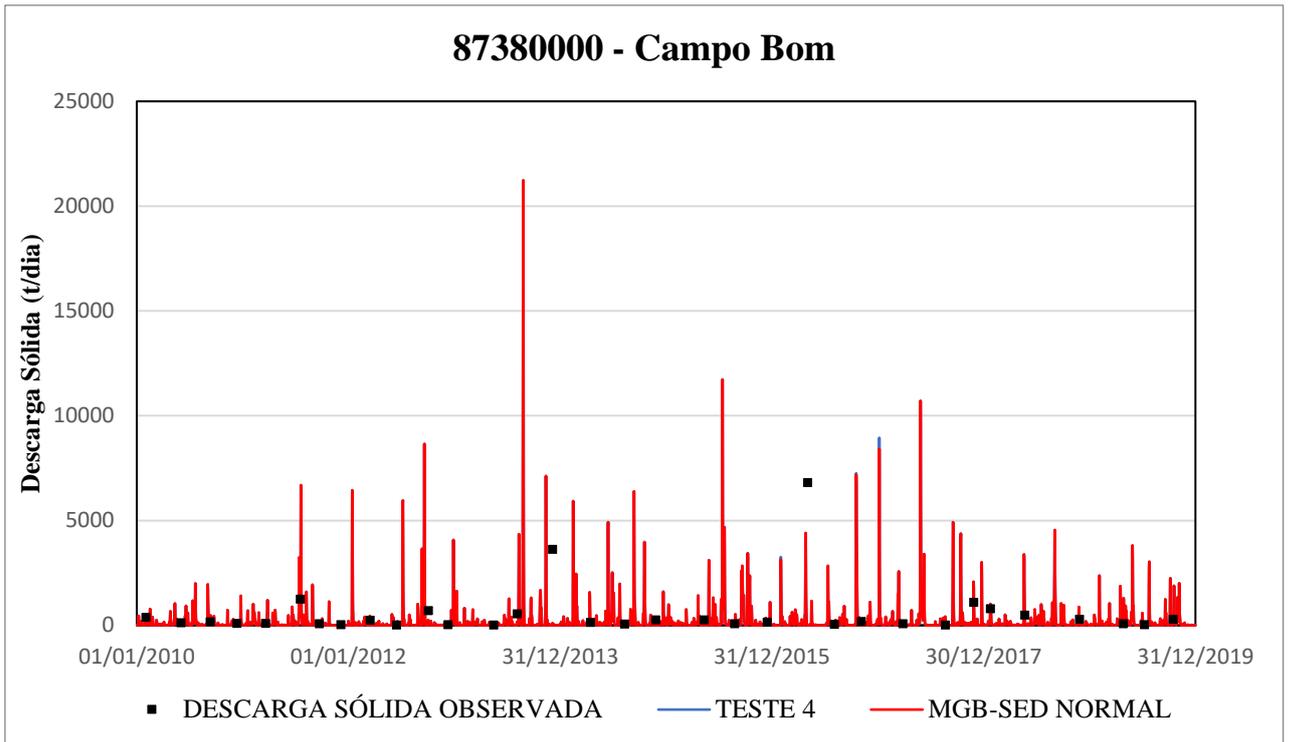


*Figura 47 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 90000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante (87374000).*

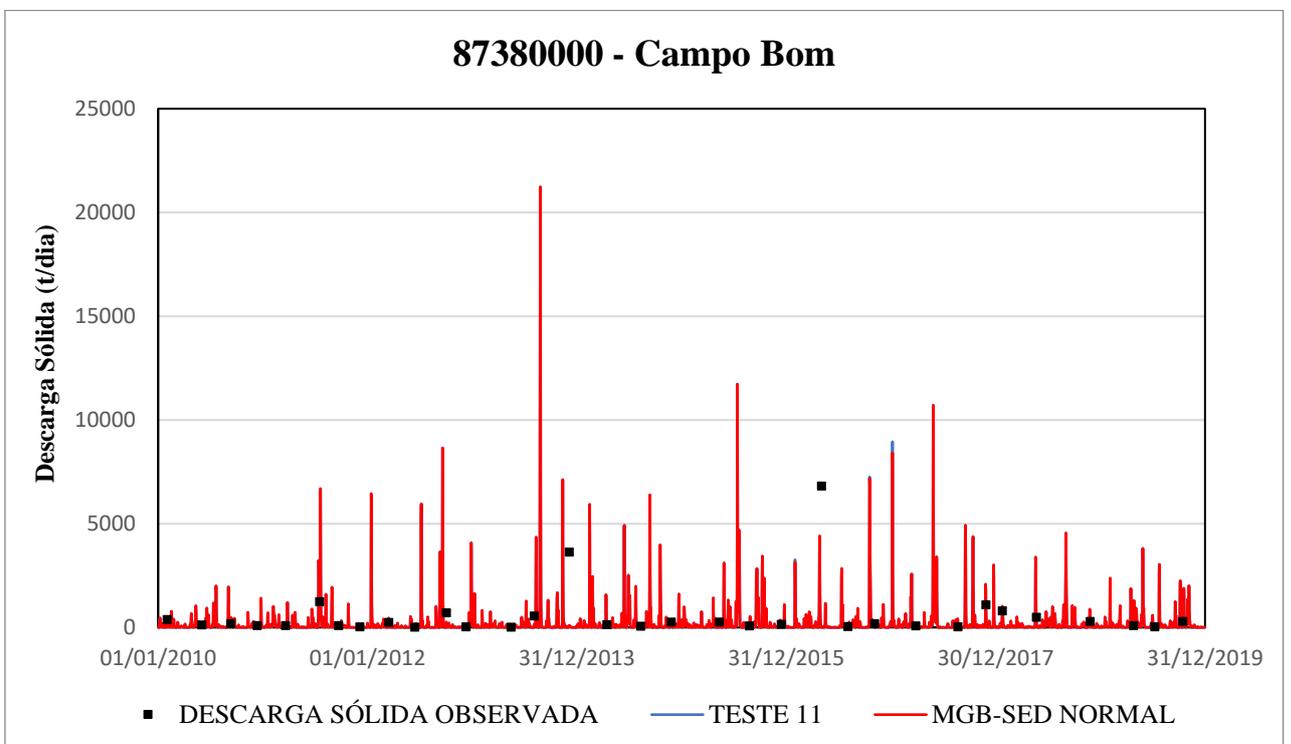
As simulações geradas com variações fator LS acumulado maior que 100000 e 90000, apresentam valores da simulação idênticos pra a estação Taquara Montante, tal fato pode ser observado nas figuras 46 e 47, que representa, as descargas sólidas em suspensão observada e simulada nos MGB-SED e MGB-SEDmm.

Para a estação Campo Bom, os resultados referentes às descargas sólidas em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm são apresentados nas figuras (48, 49 e 50).

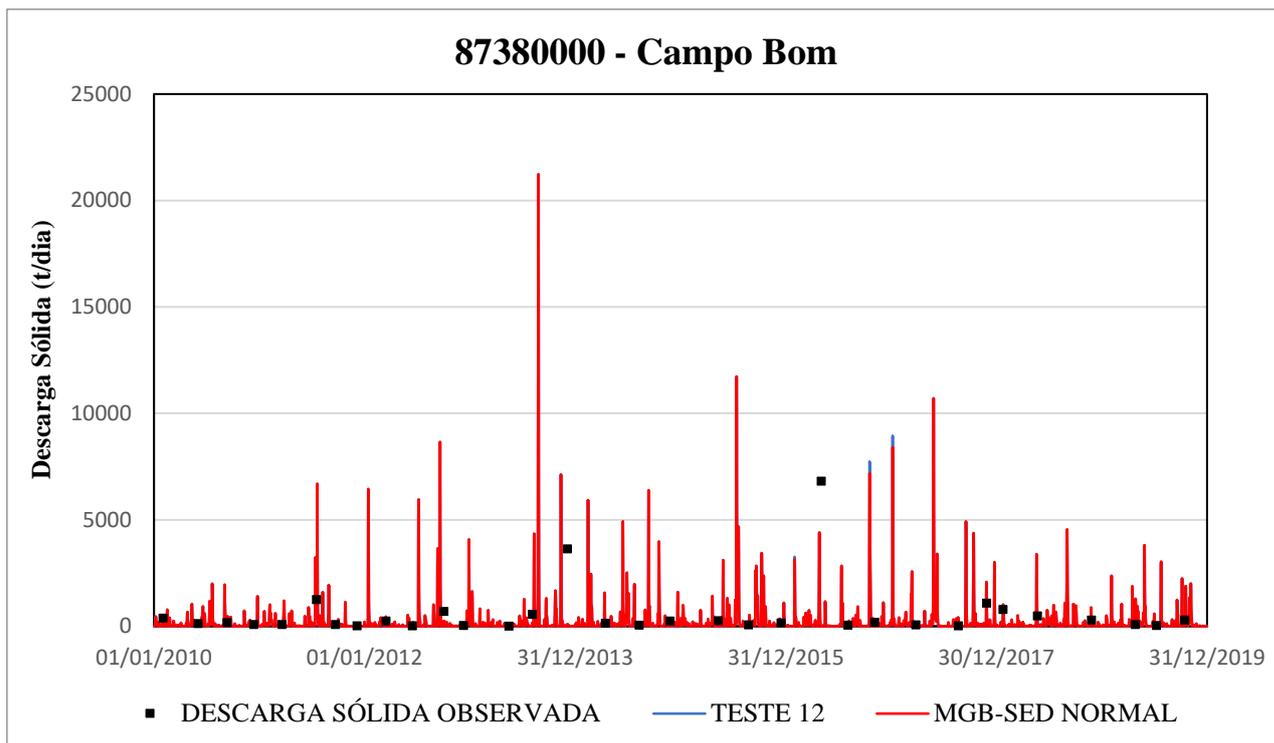
Os resultados obtidos com o gatilho do fator LS acumulado mais restritivo (>110000), apresentam variações menores de descarga sólida em suspensão em suspensão simulados (~5%), se comparada com a variação na estação anterior (~40%).



*Figura 48 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 110000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom (87380000).*



*Figura 49 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 100000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom (87380000).*

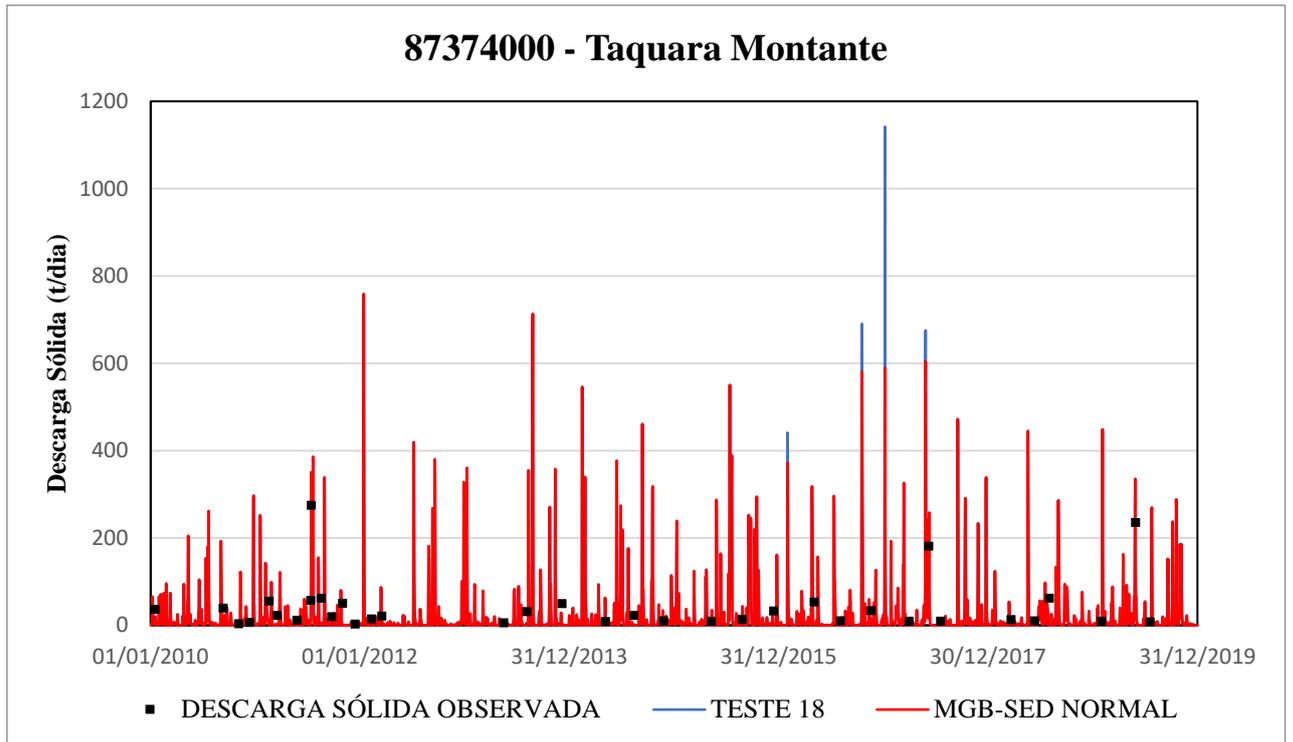


*Figura 50 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 90 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 90000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom (87380000).*

Tal como na estação anterior, o valor simulado pelo MGB-SEDmm na estação Campo Bom para as descargas sólidas em suspensão com gatilho do fator LS acumulado maior que 90000, apresentam valores da simulação, praticamente idênticos, com a variação sendo menor 10% em todos os casos.

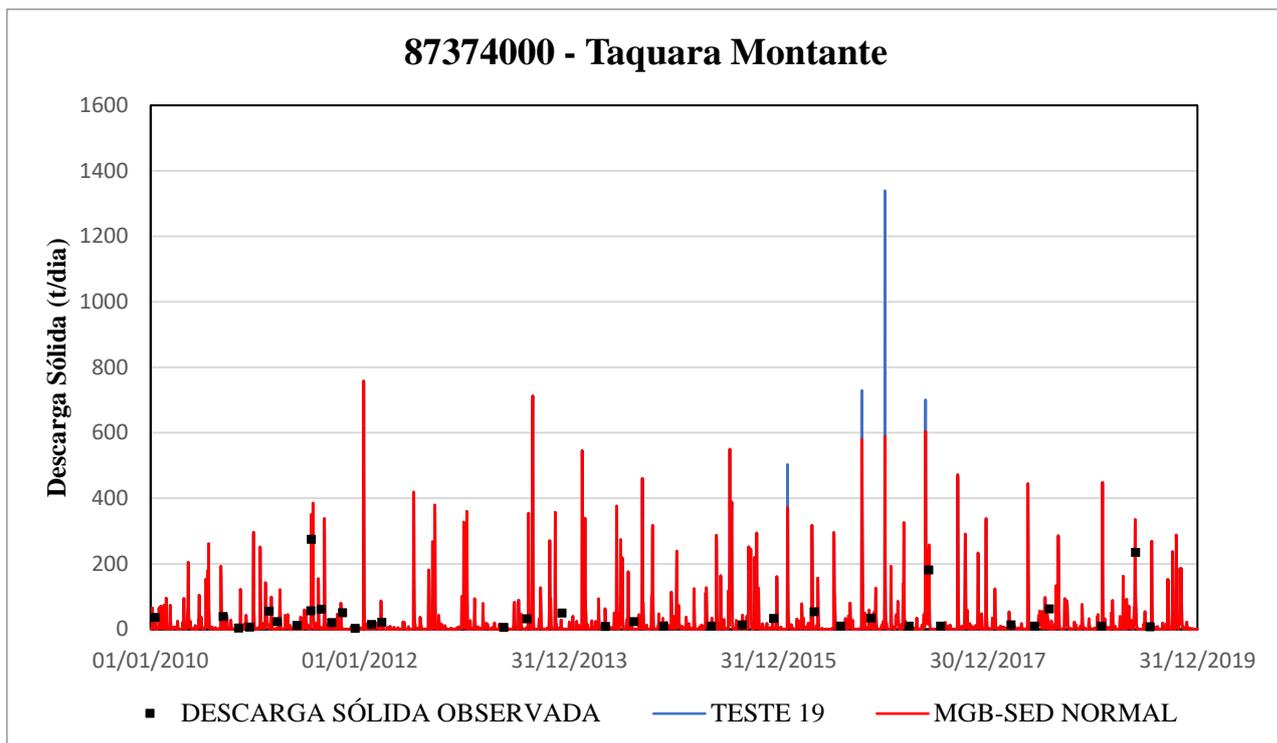
### 5.3.5. MULTIPLICADOR DA MUSLE

As figuras 51 a 54 apresentam a descarga sólida em suspensão em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm, nas estações Taquara Montante (87374000) e Campo Bom (87380000), resultantes das simulações 18 e 19. Neste conjunto de simulações o MGB-SEDmm foi definido fixo no gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e gatilho pluviométrico maior que 100, sendo assim foi variado o multiplicador da MUSLE, sendo maior que dez vezes, quinze vezes e vinte vezes.



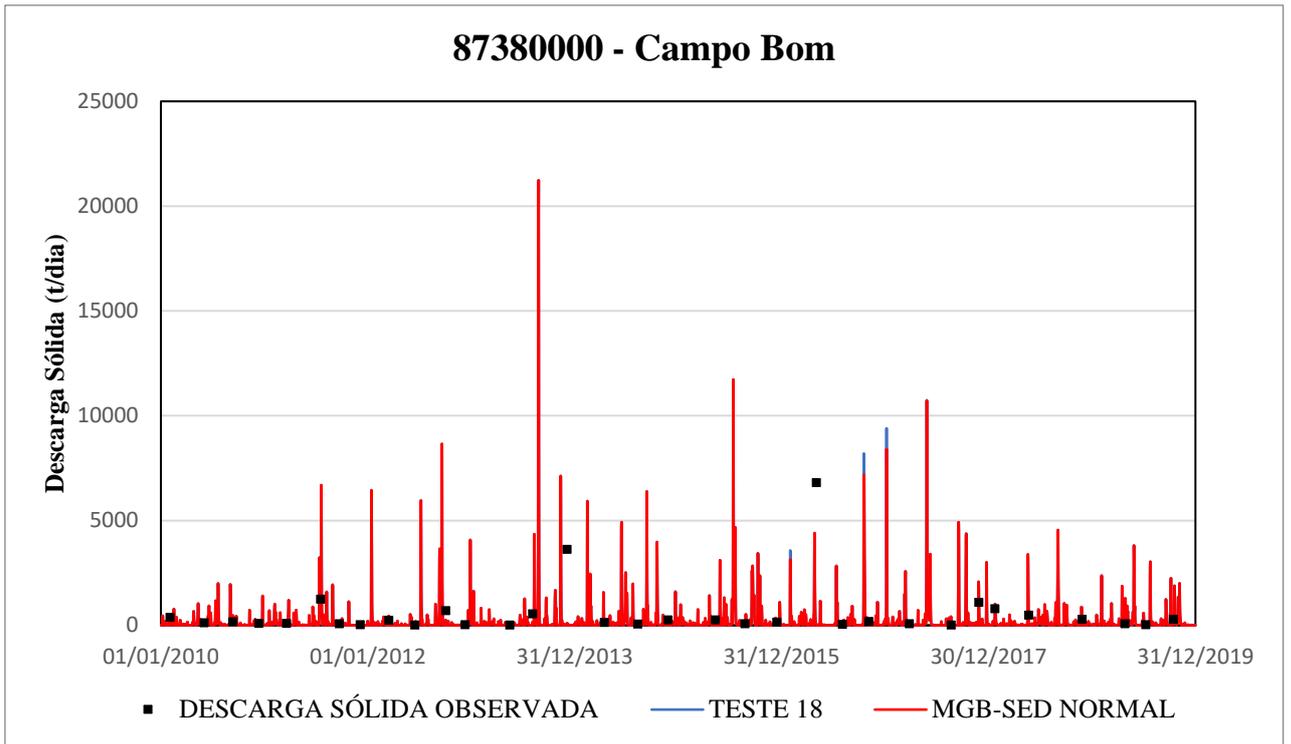
*Figura 51 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 15 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante (87374000).*

Os resultados obtidos com o multiplicador de quinze vezes a MUSLE apresentaram um aumento de 95% no maior pico (05/01/2017) em relação MGB-SED, nos três picos restantes a variação não é maior que 15%.

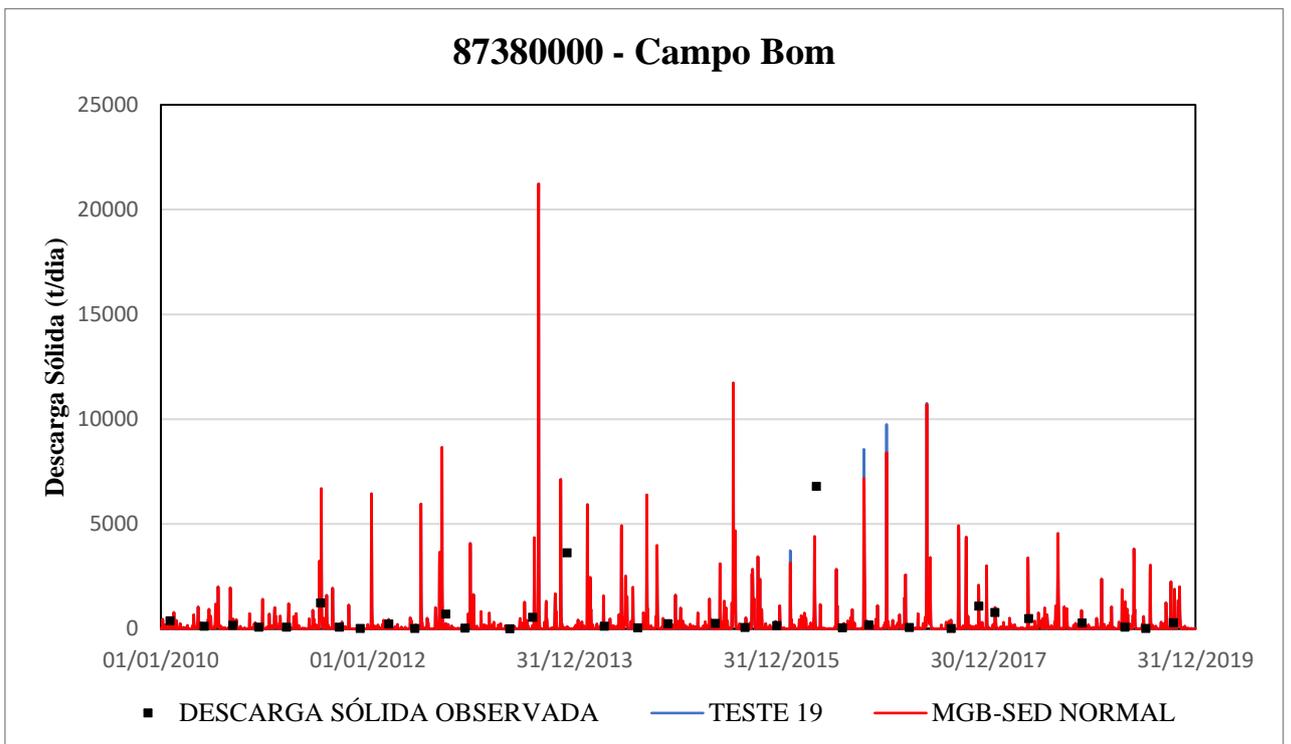


*Figura 52 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 20 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante (87374000).*

Os resultados obtidos com o multiplicador de vinte vezes a MUSLE (figura 52) apresentaram um aumento de 127% no maior pico (05/01/2017) em relação MGB-SED, nos três picos restantes a variação não é maior que 15%.



*Figura 53 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 15 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom (87380000).*



*Figura 54 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 100 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 20 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom (87380000).*

As variações no multiplicador da MUSLE, para 15 e 20 vezes, surtiram pequenos acréscimos aos 3 picos (31/01/2016, 17/10/2016 e 05/01/2017), quando visualizados na estação Campo Bom, figuras 53 e 54, não ultrapassando 15% de variação.

### 5.3.6. MÉTRICAS DE DESEMPENHO DOS RESULTADOS OBTIDOS

A tabela 25 apresenta os valores das métricas de desempenho, Nash-Sutcliffe, Correlação de Pearson e erro de volumes ( $\Delta V$ ), para as simulações com os gatilhos e multiplicador da MUSLE. Como comentado anteriormente a falta de medições de sedimentos em períodos com grandes concentrações de sólidos em suspensão, para posterior cálculo de descarga sólida em suspensão, faz com que as alterações realizadas no modelo não sejam percebidas nas métricas de desempenho, visto que os aumentos dos picos ocorrem em dias que não possuem dados observados. As únicas simulações com alterações positivas são as que ocorrem alteração geral dos dados simulados, ou seja, simulações com gatilhos mais abrangentes.

*Tabela 25 - Comparação dos resultados das métricas de desempenho da descarga sólida em suspensão obtidas nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm, para o período de estudo, o asterisco identifica a estação sem os dados possivelmente espúrios.*

Testes	87374000			87380000			87380000*		
	NASH	r	$\Delta V$	NASH	r	$\Delta V$	NASH	r	$\Delta V$
MGB-SED	0,5199	0,8468	58,7%	-0,1154	0,0590	72,2%	0,4438	0,7417	36,9%
1	0,5199	0,8468	58,7%	-0,1154	0,0590	72,2%	0,4438	0,7417	36,9%
2	0,5403	0,8535	57,9%	-0,1154	0,0594	72,1%	0,4431	0,7415	36,6%
3	0,5199	0,8468	58,7%	-0,1154	0,0590	72,2%	0,4438	0,7417	36,9%
4	0,5199	0,8468	58,7%	-0,1154	0,0590	72,2%	0,4438	0,7417	36,9%
5	0,5403	0,8535	57,9%	-0,1154	0,0594	72,1%	0,4431	0,7415	36,6%
6	0,5403	0,8535	57,9%	-0,1159	0,0611	71,6%	0,4342	0,7390	35,5%
7	0,5523	0,8600	57,6%	-0,1161	0,0615	71,5%	0,4312	0,7383	35,3%
8	0,5199	0,8468	58,7%	-0,1154	0,0590	72,2%	0,4438	0,7417	36,9%
9	0,5199	0,8468	58,7%	-0,1154	0,0590	72,2%	0,4438	0,7417	36,9%
10	0,5199	0,8468	58,7%	-0,1154	0,0590	72,2%	0,4438	0,7417	36,9%
11	0,5199	0,8468	58,7%	-0,1154	0,0590	72,2%	0,4438	0,7417	36,9%
12	0,5199	0,8468	58,7%	-0,1154	0,0590	72,2%	0,4438	0,7417	36,9%
13	0,5199	0,8468	58,7%	-0,1154	0,0590	72,2%	0,4438	0,7417	36,9%
14	0,5694	0,8666	56,9%	-0,1167	0,0627	71,1%	0,4195	0,7356	34,4%
15	0,5857	0,8726	56,3%	-0,1176	0,0637	70,7%	0,4044	0,7326	33,5%
16	0,5199	0,8468	58,7%	-0,1154	0,0590	72,2%	0,4438	0,7417	36,9%
17	0,5199	0,8468	58,7%	-0,1154	0,0590	72,2%	0,4438	0,7417	36,9%
18	0,5199	0,8468	58,7%	-0,1154	0,0590	72,2%	0,4438	0,7417	36,9%
19	0,5199	0,8468	58,7%	-0,1154	0,0590	72,2%	0,4438	0,7417	36,9%

## 6. CONCLUSÕES

Considerando que o objetivo principal deste trabalho era propor e avaliar gatilhos e multiplicadores para a modelagem de movimentos de massa na bacia do rio dos Sinos, o estudo mostrou promissora a aplicação dos gatilhos e multiplicadores testados, sendo que foi possível gerar um pico de descarga sólida em suspensão, na estação Taquara Montante, para o dia do evento de movimentos de massa na região de Rolante – RS. Assim, seguimos para as respostas aos objetivos específicos do presente estudo:

- Avaliar a adequação dos valores encontrados na modelagem hidrológica, em termos de correlação e tendência média dos dados observados em relação aos dados simulados e possíveis melhorias na metodologia de calibração do modelo;

A simulação hidrológica, realizada por meio do modelo MGB, apresentou valores bons a muito bons nas métricas de desempenho utilizadas, apesar da falta de dados pluviométricos na bacia para a realização da modelagem.

De modo geral, as métricas de desempenho, Nash-Sutcliffe, Correlação de Pearson e Erro de volume ( $\Delta V$ ) tiveram pequenas variações entre os resultados obtidos na calibração e na validação do modelo hidrológico, sendo a maior variação negativa a ocorrida na estação Campo Bom, com Nash variando negativamente 0,12, porém as demais métricas melhoraram na validação, sendo a melhor delas a variação de 7,7% no erro de volume na estação Campo Bom.

Pontos a serem observados na modelagem hidrológica foi o uso do autocalibrador do modelo ocorrendo na presença de dados sem coerência física.

- Avaliar se os valores encontrados na simulação hidrossedimentológica estão de acordo com os valores médios encontrados na literatura e dados medidos in situ;

A simulação de sedimentos, realizada por meio do modelo MGB-SED, apresentou mais dificuldades que a modelagem hidrológica, principalmente pela falta de dados de sedimentos que representem a variação temporal de forma contínua e, o fato de alguns dados observados apresentarem valores muito altos, distantes de eventos de chuva ou mesmo de eventos simulados, comprometendo assim a confiabilidade dos dados medidos in situ. Considerando este tipo de dados como espúrio, as métricas de desempenho tanto na calibração quanto na validação apresentam, na descarga sólida em suspensão valores bons a muito bons.

A falta de dados de sedimentos na bacia tornou-se um problema inclusive para a validação, sendo que a estação Taquara (estação mais a montante da bacia) não possui dados para o período

de validação, dificultando a análise. Com os dados existentes a validação apresentou pequenas variações nas métricas de desempenho, em relação aos valores da validação, assim é possível considerar a modelagem bem sucedida, visto que a calibração e validação apresentaram valores de satisfatório a muito bons.

Como comentado nos parágrafos anteriores, a falta de dados de sedimentos na bacia tornou a modelagem hidrossedimentológica complexa, visto a dificuldade para realização de validação, sendo que uma das estações não possuía dados para além do período de calibração. A quantidade de dados de sedimentos medidos em um ano também foi um fator de dificuldade, visto que o modelo gerava 365 dados em um ano, um dado por dia, sendo esses comparados com 3 a 6 dados medidos em um ano, dessa forma a possibilidade de verificação visual do comportamento da descarga sólida em suspensão simulada com a observada se torna muito ruim, pois não é impossível verificar a correlação dos picos, dados extremos simulados e mesmo comportamento médio da descarga sólida em suspensão em função do tempo.

Sabendo dessa falta de dados de sedimentos na bacia, o monitoramento dessa variável tornasse uma questão necessária para confecção de estudos hidrossedimentológicos desta bacia. Com mais campanhas ocorrendo ao longo do ano, a obtenção de dados que representem melhor a variação da descarga sólida em suspensão, principalmente para a obtenção de valores mais altos, não necessariamente extremos.

- Avaliar se os resultados dos gatilhos propostos representam de modo satisfatório os eventos de movimento de massa ocorrido em Rolante - RS, no dia 05/01/2017.

Os resultados dos gatilhos propostos apresentaram boa resposta, sendo os gatilhos mais restritivos os melhores, apesar disso, os multiplicadores propostos não representaram a escala de grandeza correta dos eventos de movimento de massa ocorridos em Rolante, dessa forma, para a concordância desse objetivo específico o multiplicador deveria ser de maior ordem de grandeza, com valores entre 100 a 1000, vezes a equação da MUSLE.

## 7. INDICAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A seguir, são apresentadas indicações para trabalhos futuros, a partir dos resultados encontrados no presente estudo.

- Desenvolvimento de outros gatilhos para simulação da produção de sedimentos por movimentos de massa, podendo ser com precipitação acumulada, fator direto da declividade do pixel ou URH, intensidade da chuva ou mesmo umidade do solo.
- Desenvolvimento de mapa de URH para a América do Sul com menor tamanho de pixel;
- Alterar o modelo para que os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  da MUSLE possam ser calibrados de forma mais simples e com aplicação por sub-bacias, tal como outros parâmetros do MBG e MGB-SED, via interface no QGIS.
- Desenvolver aba sedimentos nas ferramentas Ana Data Acquisition e Super Manejo de Dados;
- Comparar os resultados obtidos com os gatilhos propostos com dados de sensoriamento remoto;

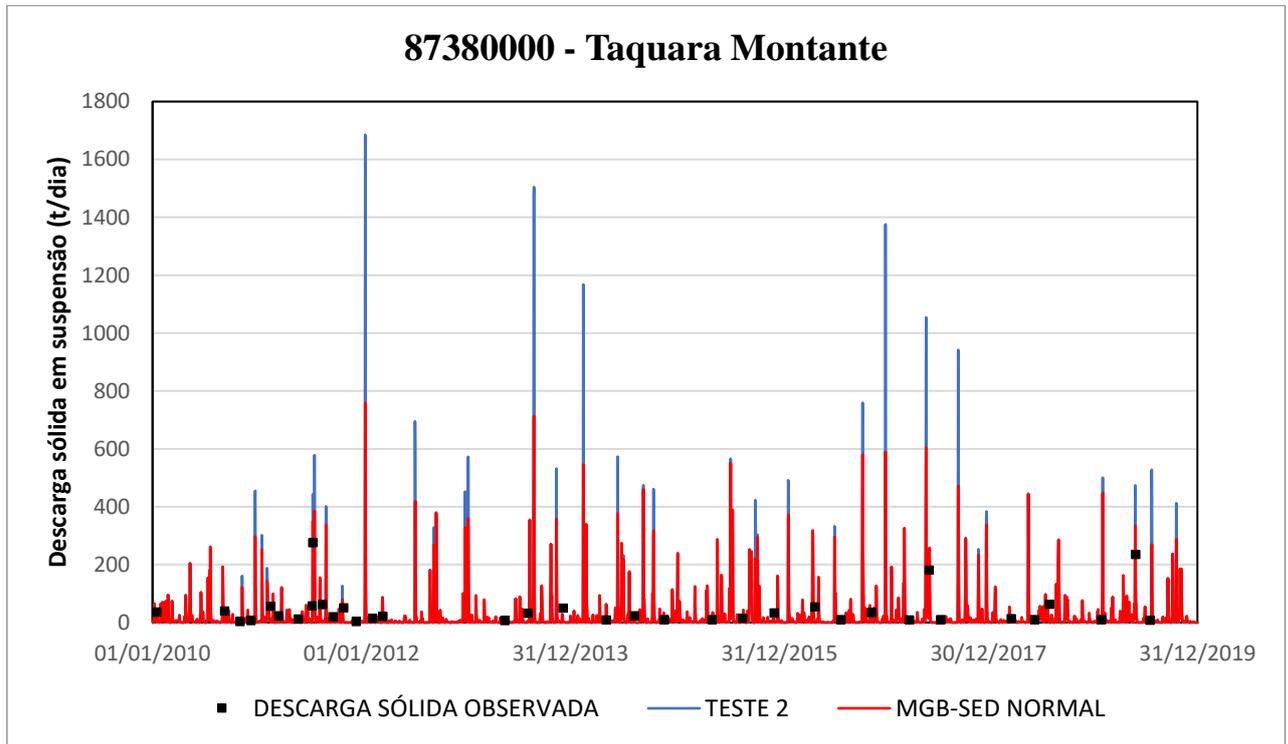
## 8. BIBLIOGRAFIA

- BERTONI, J.; LOMBARDI, N. F. **Conservação do solo**. 4. ed. São Paulo: Ícone, 1999.
- BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; CURI, N.; VIOLA, M. R.; AVANZI, J.C. **Soil prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling**. *Catena*, v. 79, p. 49-59, 2009, doi:10.1016/j.catena.2009.05.010.
- BIGARELLA, J.J.; PASSOS, E.; Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. Florianópolis: Ed. Da UFSC, 2003 v. 3 (p.877-1436).
- BORDAS, M. P; SEMMELMANN, F. R. Elementos de Engenharia de Sedimentos. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**, v. 2, Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS; ABRH, 2001, p. 915-943.
- BUARQUE, D. C. **SIMULAÇÃO DA GERAÇÃO E DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM GRANDES BACIAS: Estudo de caso do rio Madeira**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental): Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- CAINE. The Rainfall Intensity - **Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows**, *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 62:1-2, 23-27. 1980.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. 2ª. Ver. Atual. E, 2008.
- COE, J. A., J. A. Michael, R. A. Crovelli, W. Z. Savage, W. T. Laprade, and W. D. Nashem (2004), Probabilistic assessment of precipitation-triggered landslides using historical records of landslide occurrence, Seattle, Washington, *Environ. Eng. Geosci.*, 10(2), 103–122. 2004.
- COELHO, V. R; FAN, F. M. **Manual do Programa Super Manejo de Dados**. Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, versão 1.1, junho de 2016.
- COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental): Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- COMITESINOS. Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos. **Plano de bacia**. Disponível em: < <http://www.comitesinos.com.br/planodebacia/>>. Acesso em 31 mai. 2022.
- DOS SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M.; BUBA, H.; KISHI, R.; MARONE, E.; LAUTERT, L. **Hidrometria Aplicada**. CEHPAR–Centro de hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza. Instituto de tecnologia para o Desenvolvimento. Curitiba, Brasil, 2001.
- DYMOND, J. R.: Soil erosion in New Zealand is a net sink of CO<sub>2</sub>, **Earth Surf. Proc. Land.**, p. 1763–1772, 2010.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 2 ed., Rio de Janeiro: EMBRAPASPI, 2006, 306 p., ISBN 85-85864-19-2.
- ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. Interciências, 1998.
- FAGUNDES, Hugo de Oliveira. **Modelagem hidrossedimentológica de grandes bacias com apoio de dados in situ e sensoriamento remoto**. Orientador: Rodrigo Cauduro Dias de Paiva. Dissertação (Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental): Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do modelo MGB com Sistema de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, p. 243-254, 2014.

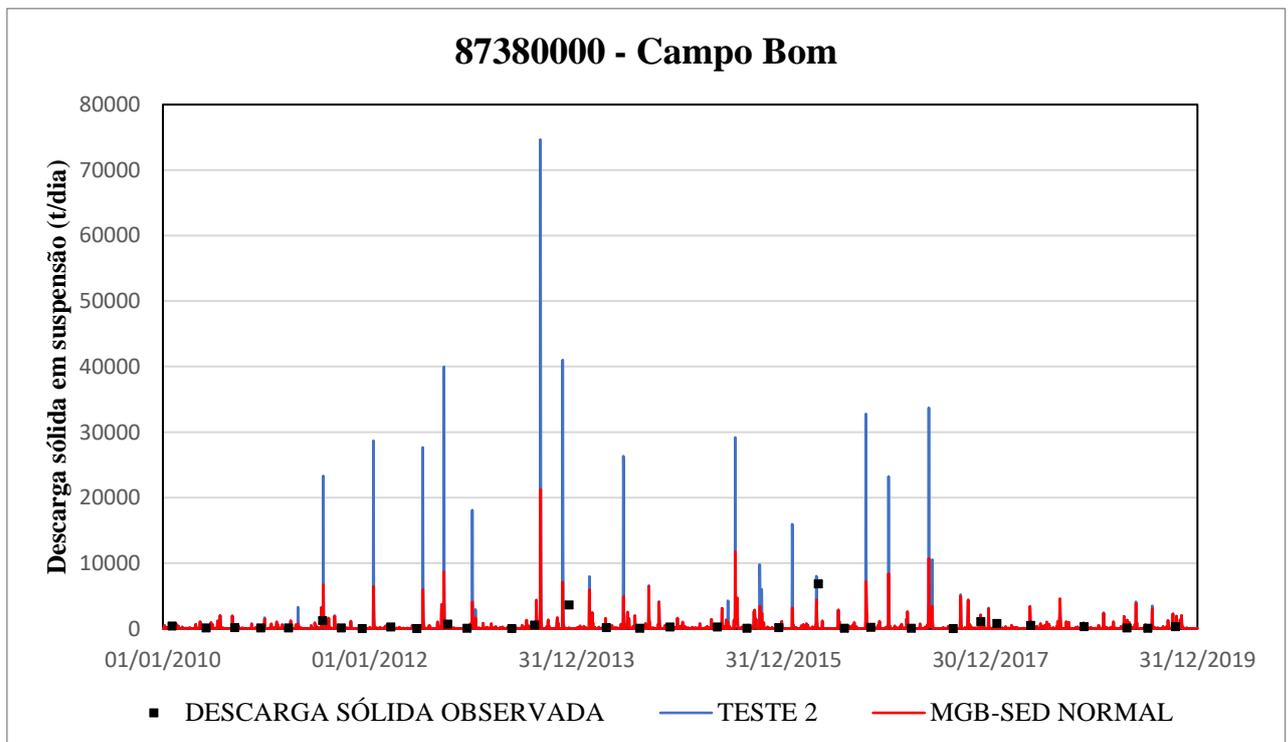
- FAN, F. M. **Previsão por conjunto de vazões afluentes a reservatórios em grandes bacias hidrográficas brasileiras.** Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015, 384 p.
- FAN, F. M.; BUARQUE, D. C.; PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. **Um mapa de Unidades de Resposta Hidrológica para a América do Sul.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 21., Brasília/DF. Anais... Brasília: ABRH, 2015
- FAO. **Digital Soil Map of the World.** FAO Geonetwork. Disponível em: < <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116>>. Último acesso: 01 de junho de 2022. Escala 1:5.000.000, 2007.
- FARINASSO, M.; CARVALHO JR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; RAMOS, V. M. Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da EUPS – Equação Universal de Perdas de Solo, utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba-PI-MA. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, ano 7, n. 2, p. 73-85, 2006.
- FILHO, A. O. 1992. **Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica.** In: Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, 1, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABMS/ABGE/PUCRJ, 1992, v.2, p.721-733.
- FLEISCHMANN, A.; SIQUEIRA, V.; PARIS, A.; COLLISCHONN, W.; PAIVA, R.; GOSSETT, M.; PONTES, P.; CALMANT, S.; BIANCAMARIA, S.; CRÉTAUX, J. F.; TANIMOUNE, B. Coupled hydrologic and hydraulic modeling of Upper Niger River Basin. **Geophysical Research Abstracts**, v. 19, 2017.
- FOEGER, L. et. al.,. **Large-scale sediment modeling with inertial flow routing: Assessment of Madeira river basin.** Environmental Modelling & Software 149. 2022
- GERMAIN, D., Roy, S., & Guerra, A. J. T. (2021). **Empirical Rainfall Thresholds for Landslide Occurrence in Serra do Mar, Angra dos Reis, Brazil.** In Y. Zhang, & Q. Cheng (Eds.), Landslides. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.100244>
- IPT –Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. Ocupação de encostas.Coord. Cunha, M. A. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1991.
- MARCONDES, C. R. **Estudo da descarga sólida em suspensão em suspensão nos cursos d'água da bacia hidrográfica do Rio Sapucaí.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia). Universidade Federal de Itajubá, 2011, 78p.
- MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling and Software**, v. 18, n. 8–9, p. 761–799, 2003.
- MILLER, A.J., 1990. Flood Hydrology and Geomorphic Effectiveness in the Central Appalachians. **Earth Surface Processes and Landforms** 15:119-134
- 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. **American Society of Agricultural and Biological Engineers.** Transactions of the ASABE, v. 50, p. 885-900, 2007.
- NEGRÃO, A. CAMPANHA, G. **Processos em Encosta.** Universidade de São Paulo, Instituto de Geociência, USP. Disponível em: <https://goo.gl/st8SAi>. Acesso em: 7 jun 2018.
- KINNELL, P.; RISSE, L. USLE-M: Empirical modelling rainfall erosion through runoff and sediment concentration. **Soil Sci Soc Am J**, v. 62, n. 6, p. 1667–1672, 1998.
- PAIVA, R. C. D. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias. Estudo de caso: bacia do Rio Solimões.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, 2009, 168p

- PANDEY, A.; HIMANSHU, S. K.; MISHRA, S. K.; SINGH, V. P. **Catena Physically based soil erosion and sediment yield models revisited**. *Catena*, v. 147, p. 595–620, 2016. Elsevier B.V.
- POPESCU, Ioana. **COMPUTAL HYDRAULICS**. Numerical methods and modelling. Londres, Reino Unido. 2014.
- RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A.; MCCOOL, D.A. AND YODER, D.C. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). **Agricultural Handbook**, Vol. 703. US Government Print Office, Washington, DC, 1997.
- SANTOS, L. L.; **Modelos Hidráulicos-Hidrológicos: Conceitos e Aplicações**. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 2, p. 1–19.1. 2009
- SANTOS, R. F. dos. **Planejamento ambiental: Teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.
- SEMA; GPDEN/IPH/UFRGS (2017) **Diagnóstico preliminar**. Departamento de Recursos Hídricos da SEMA e Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais do IPH/UFRGS. Porto Alegre: DRH/SEMA, 26p. Disponível em [http://www.rs.gov.br/upload/20170125183225diagnostico\\_preliminar\\_gt\\_rolante\\_revfinal.pdf](http://www.rs.gov.br/upload/20170125183225diagnostico_preliminar_gt_rolante_revfinal.pdf). Acesso em 13 de Junho de 2022.
- SIQUEIRA, V, A; FLEISCHMANN, A, S; JARDIM, P, F; FAN, F, M; COLLISCHONN, W. IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology aquisition in open-source environment. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, p. 274-287, 2016.
- SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. Desenvolvimento de um modelo hidrológicohidrodinâmico para a América do Sul: parte 1. In: **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2017, Florianópolis. Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRH, 2017.
- SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION. **Determination of Fluvial Sediment Discharge**. Inter-Agency Committee on Water Resources. Report nº 14. Washington, 1963.
- TOMINAGA, Lídia Keiko, et al., organizadores. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. 1a. ed, Instituto Geológico, 2009.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, Porto Alegre, 1998.
- WILLIAMS, J. R. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In.: **Proceedings of the Sediment-Yield Workshop**, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi. 1975.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. U. S. Department of Agriculture, **Agriculture handbook No. 282**, 1965.
- ZANANDREA, F.; KOBIYAMA, M.; MICHEL, G. P. **Conectividade Hidrossedimentológica: uma abordagem conceitual**. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017, Florianópolis. Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRH, 2017.

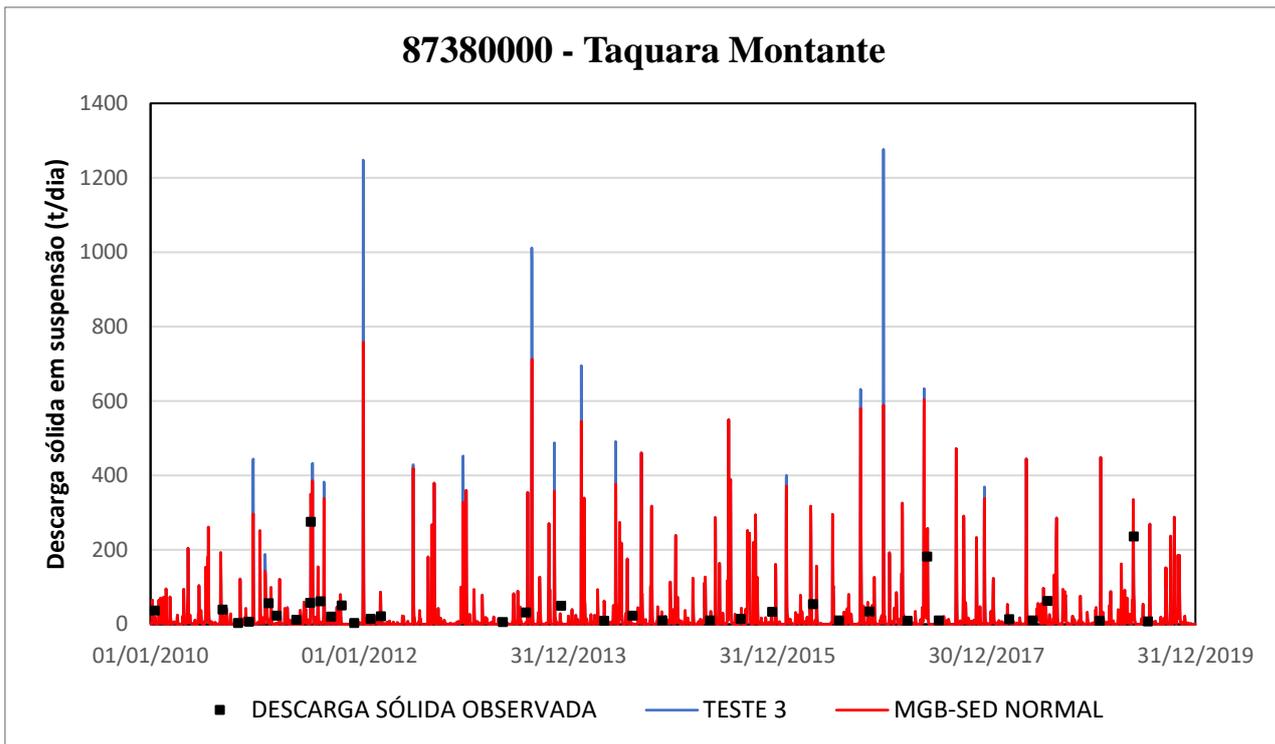
## 9. APÊNDICE – SIMULAÇÕES NÃO APRESENTADAS



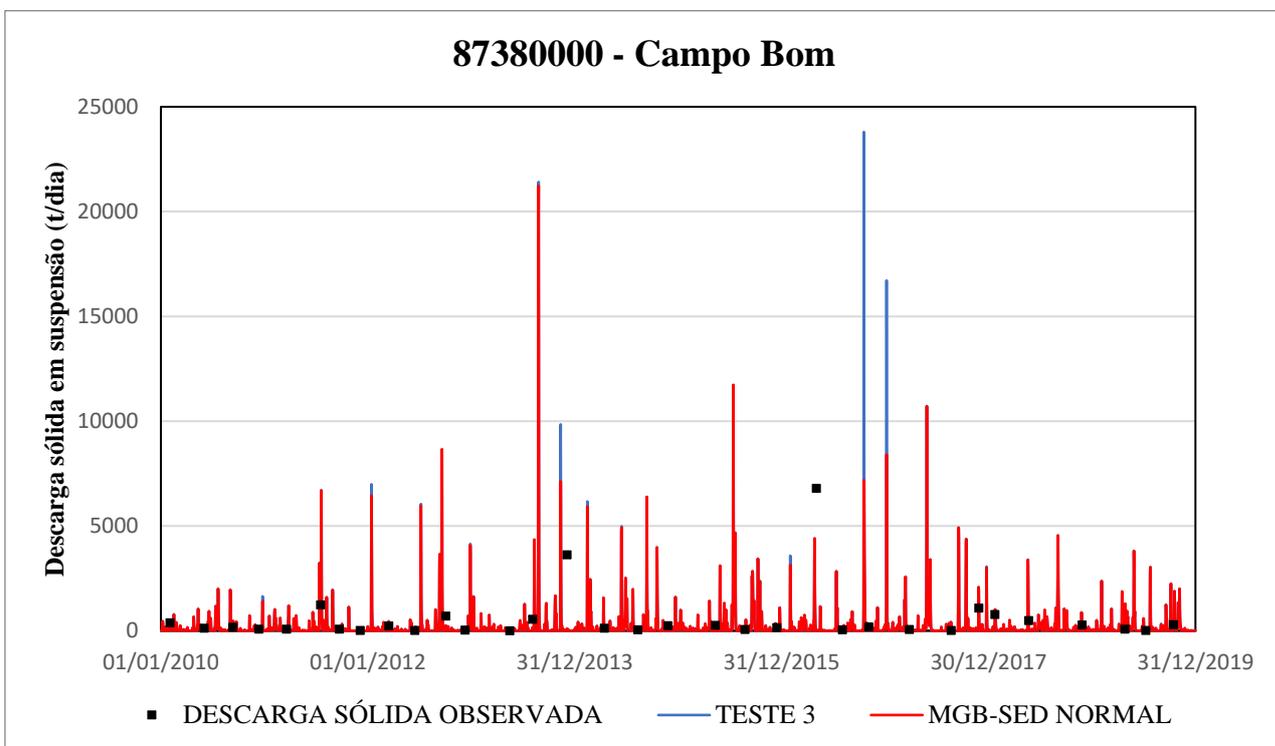
*Figura 55 – Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 60 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 110000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante.*



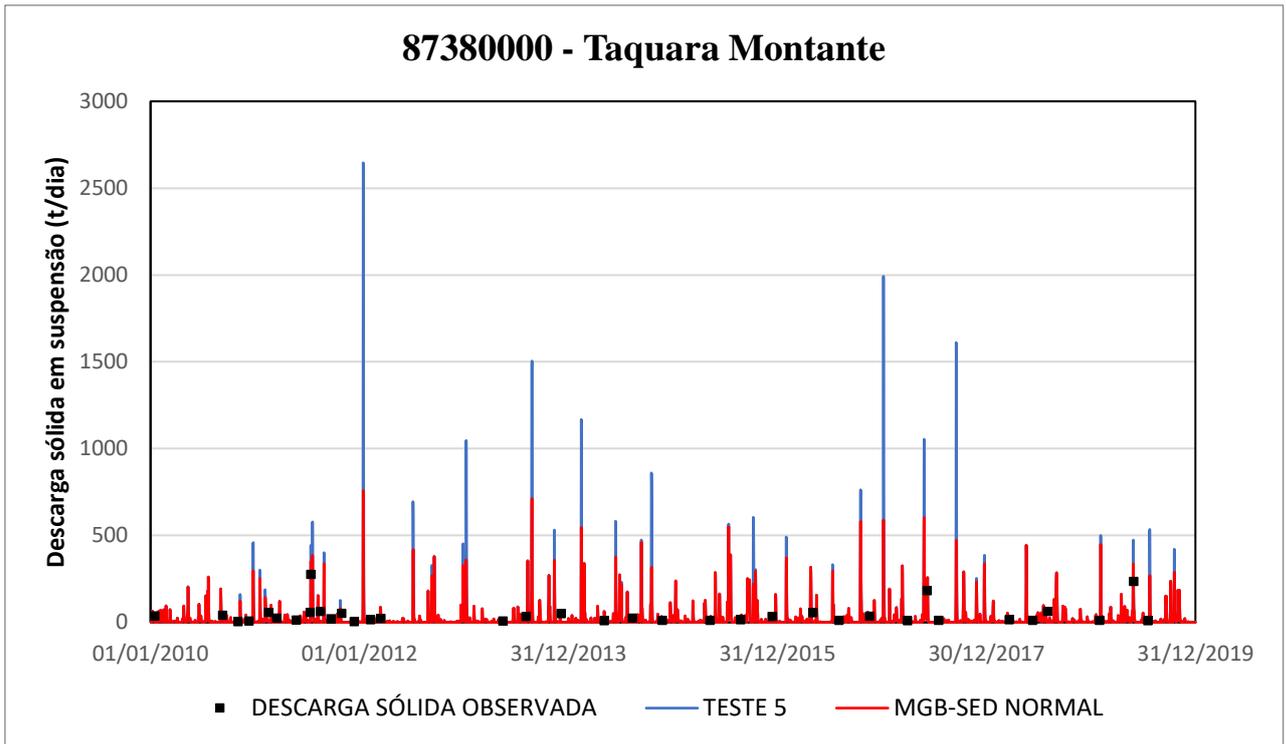
*Figura 56 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 60 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 110000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom.*



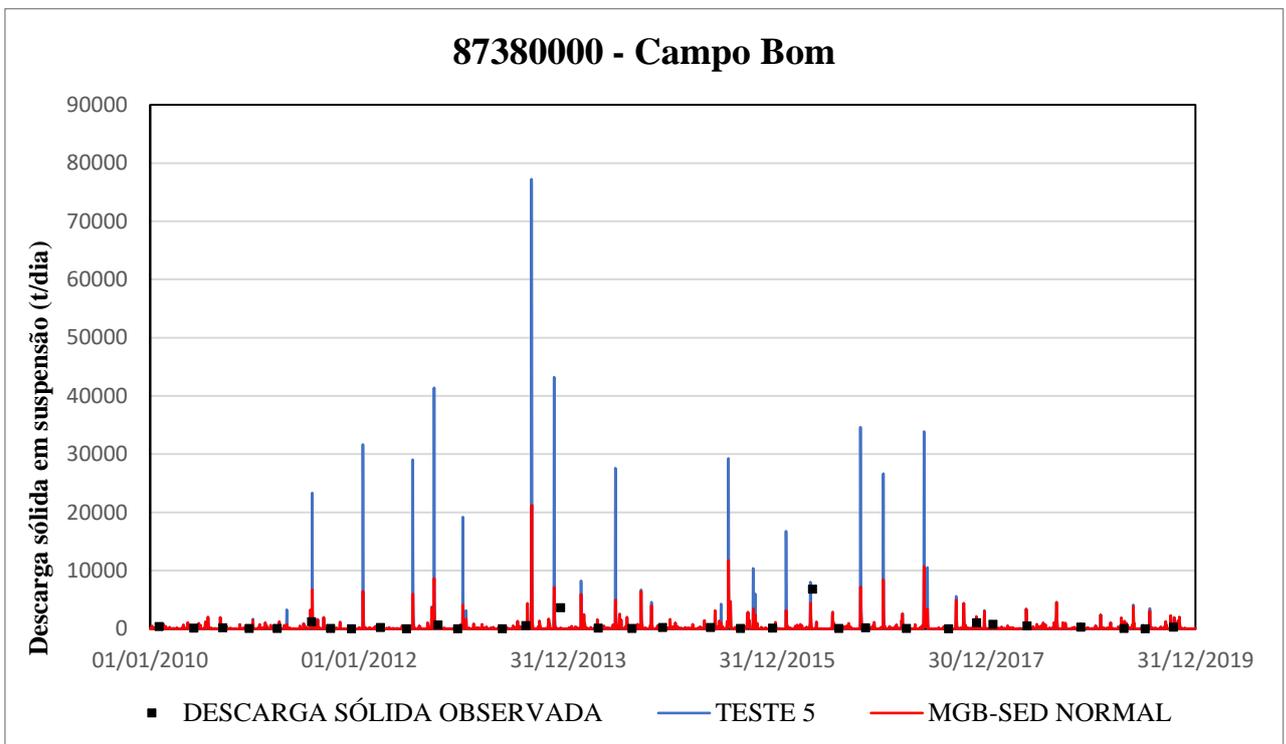
*Figura 57 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 80 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 110000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante.*



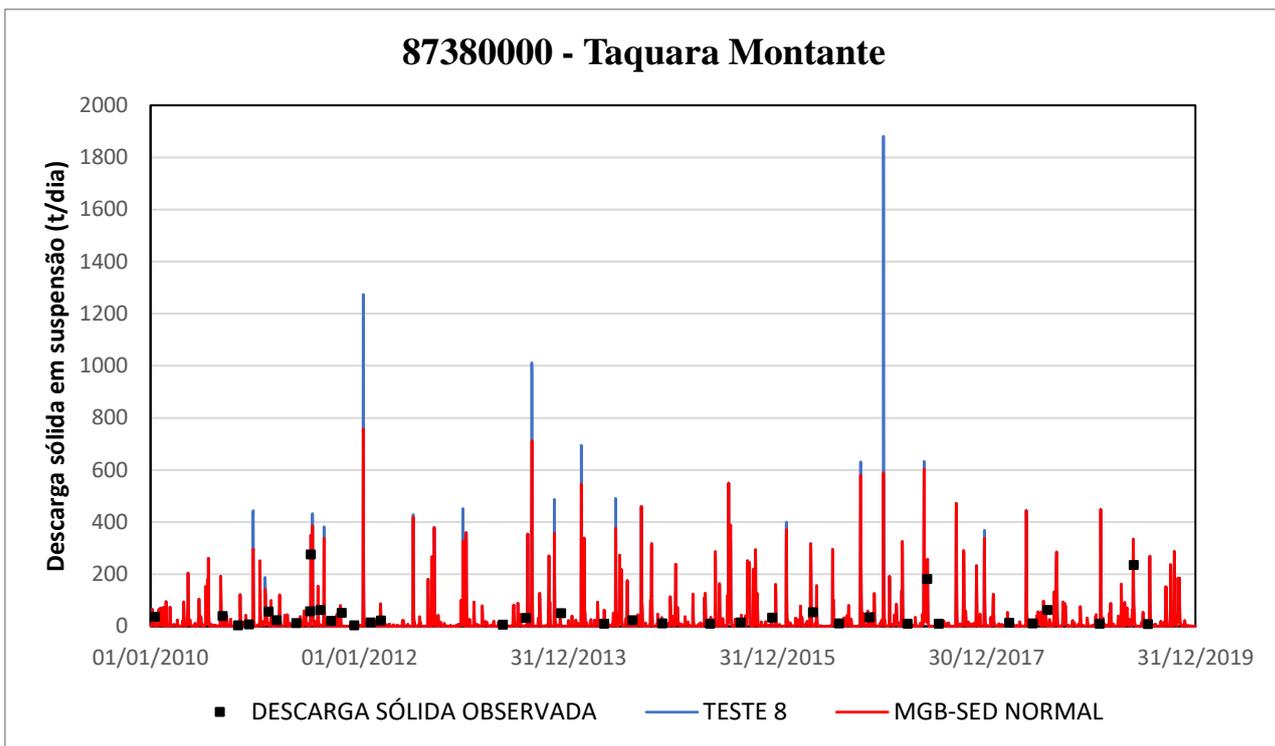
*Figura 58 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 80 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 110000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom.*



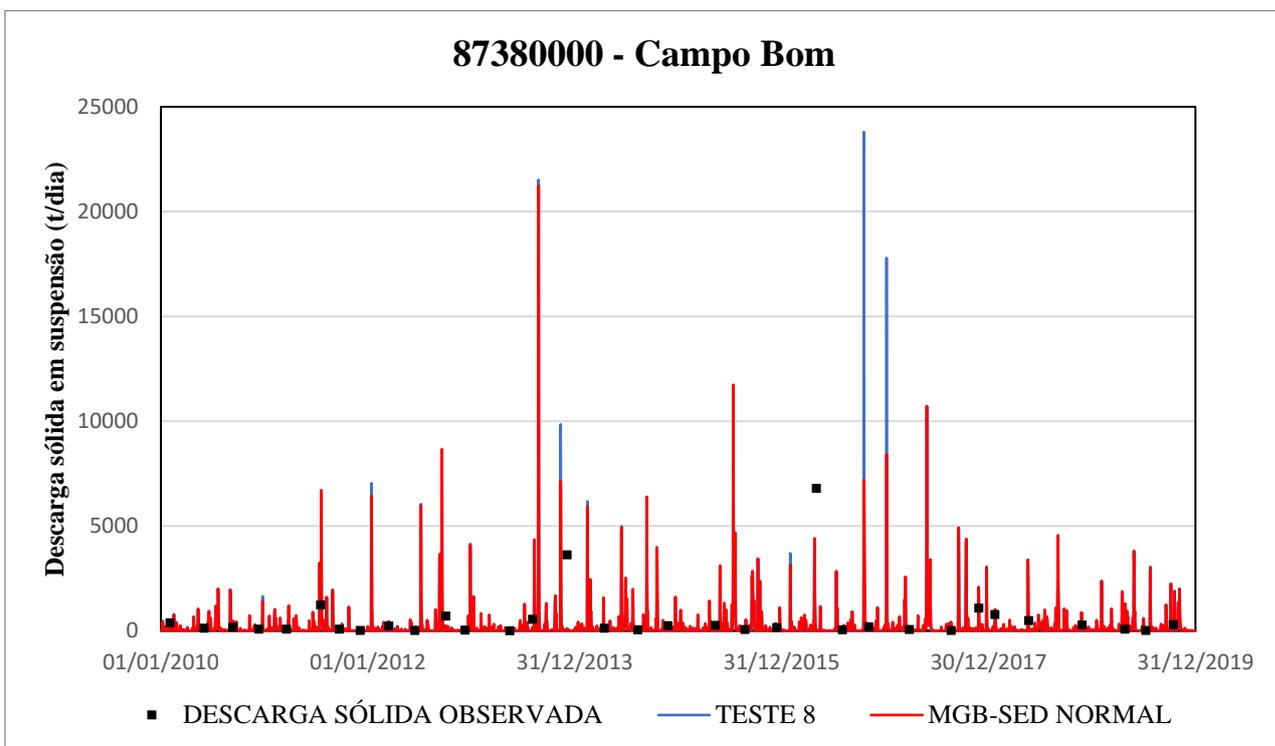
*Figura 59 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 60 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 100000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante.*



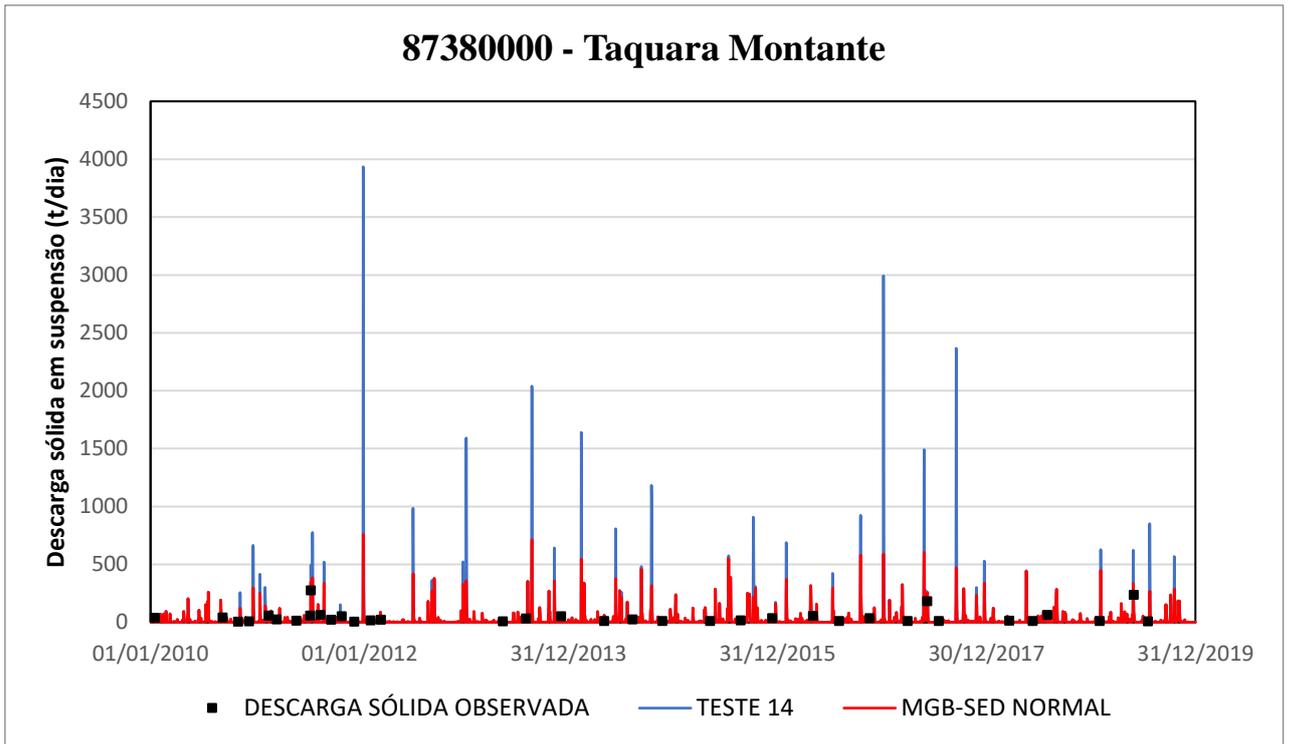
*Figura 60 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 60 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 100000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom.*



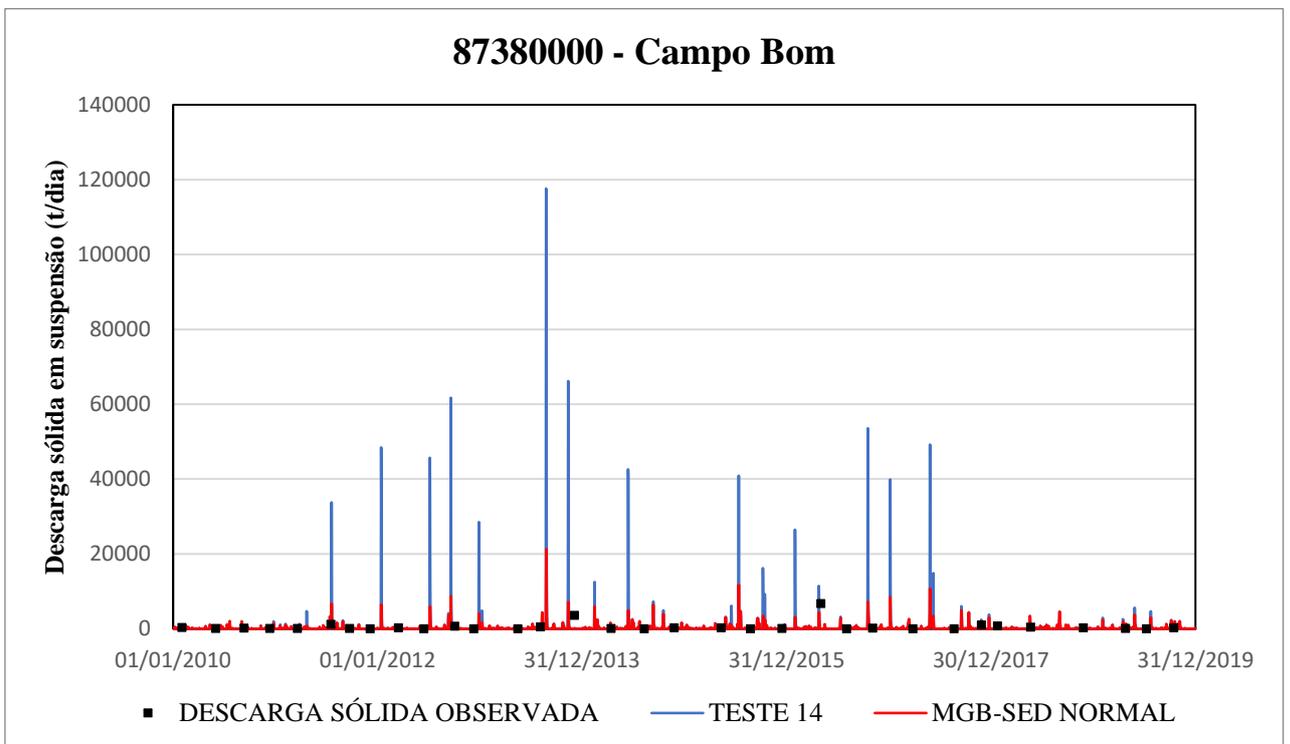
*Figura 61 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 80 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 100000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante.*



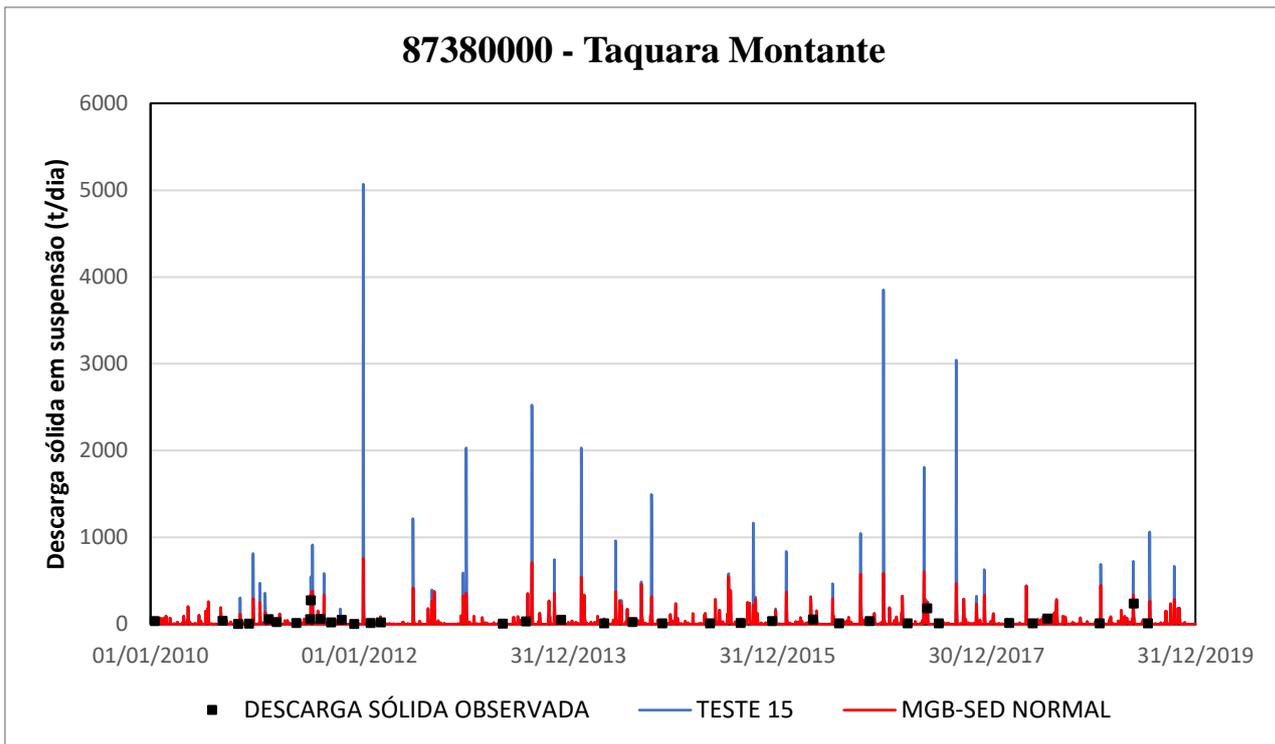
*Figura 62 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 80 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 100000 e multiplicador de 10 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom.*



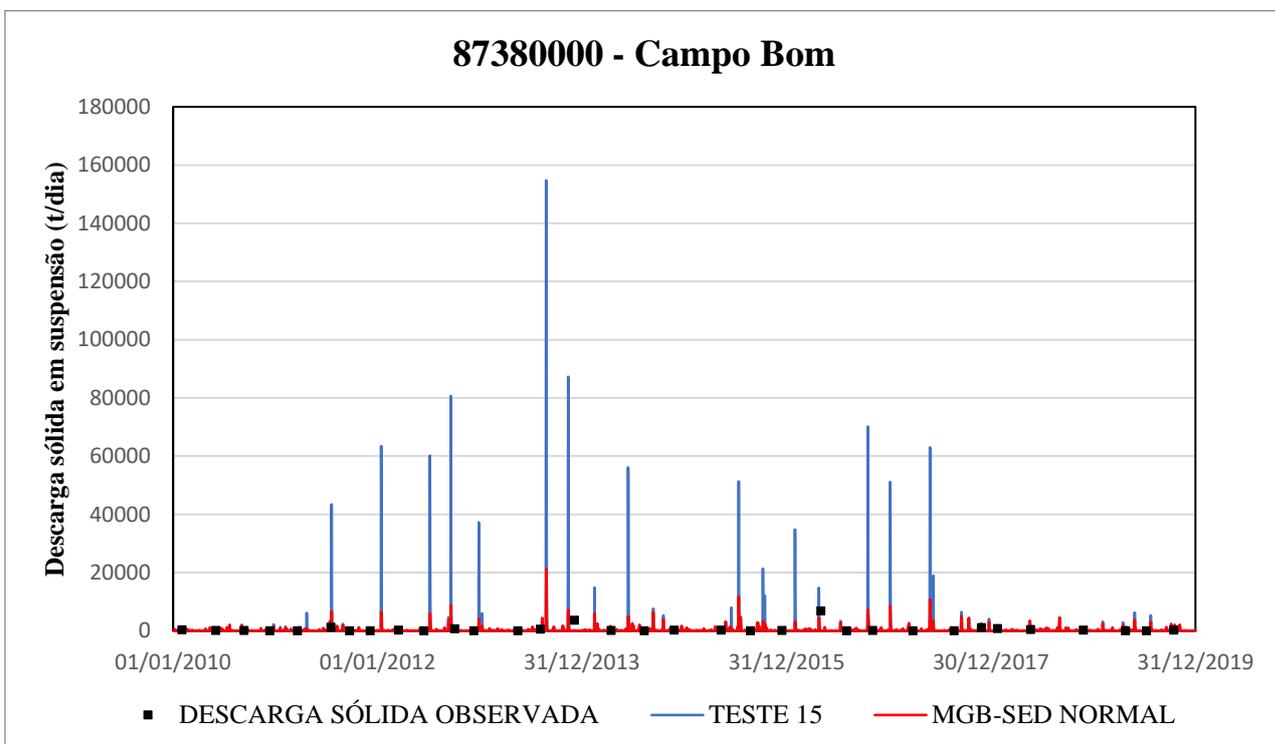
*Figura 63 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 60 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 15 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante.*



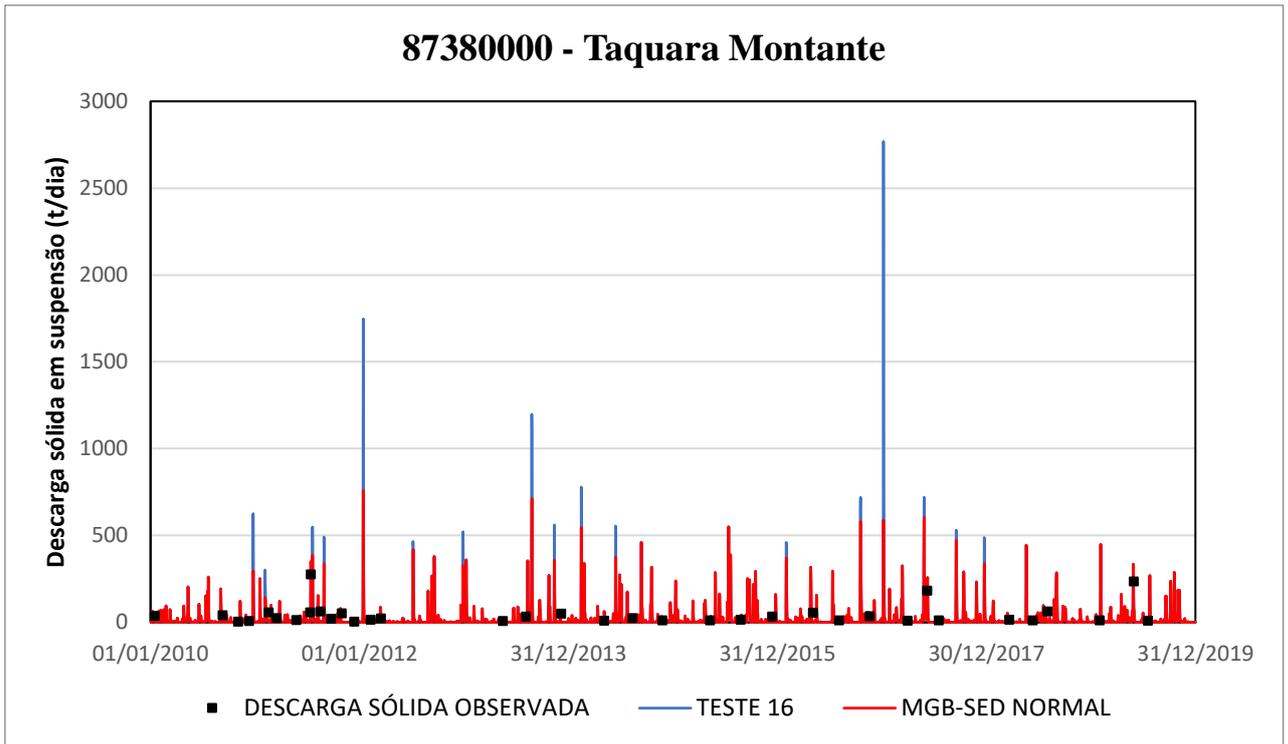
*Figura 64 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 60 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 15 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom.*



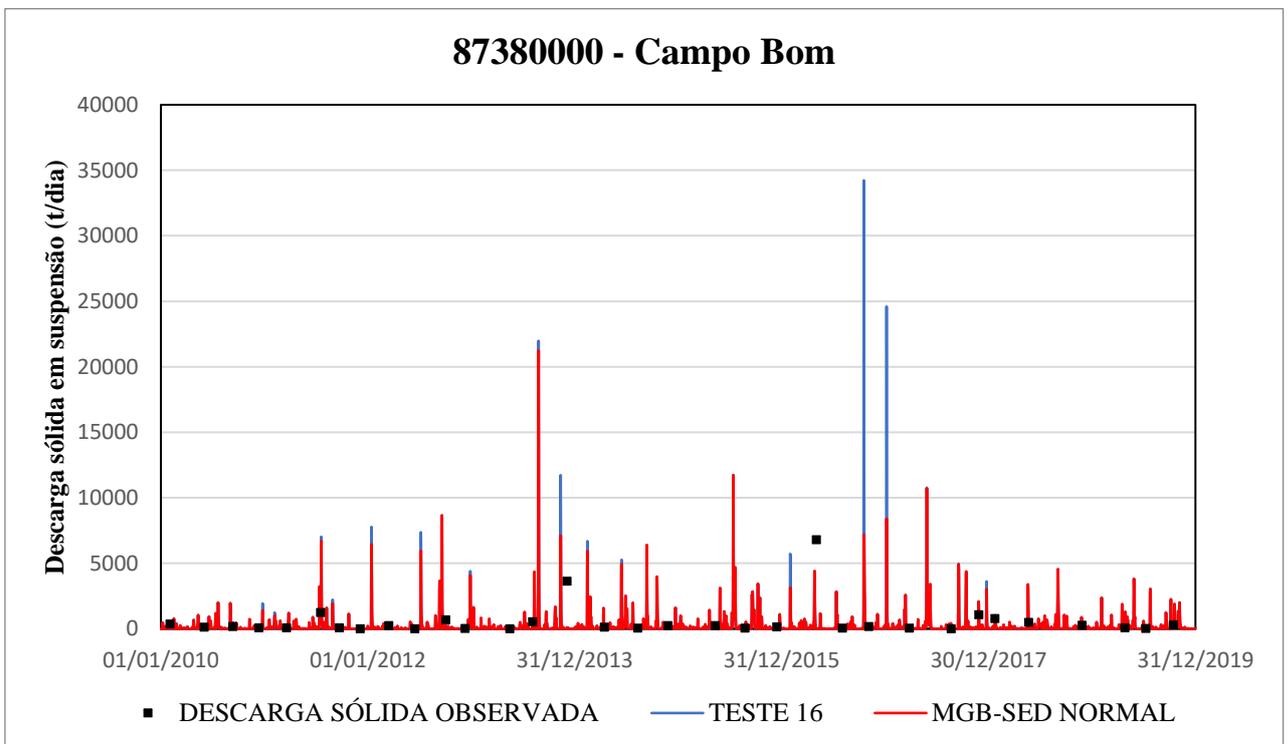
*Figura 65 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 60 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 20 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante.*



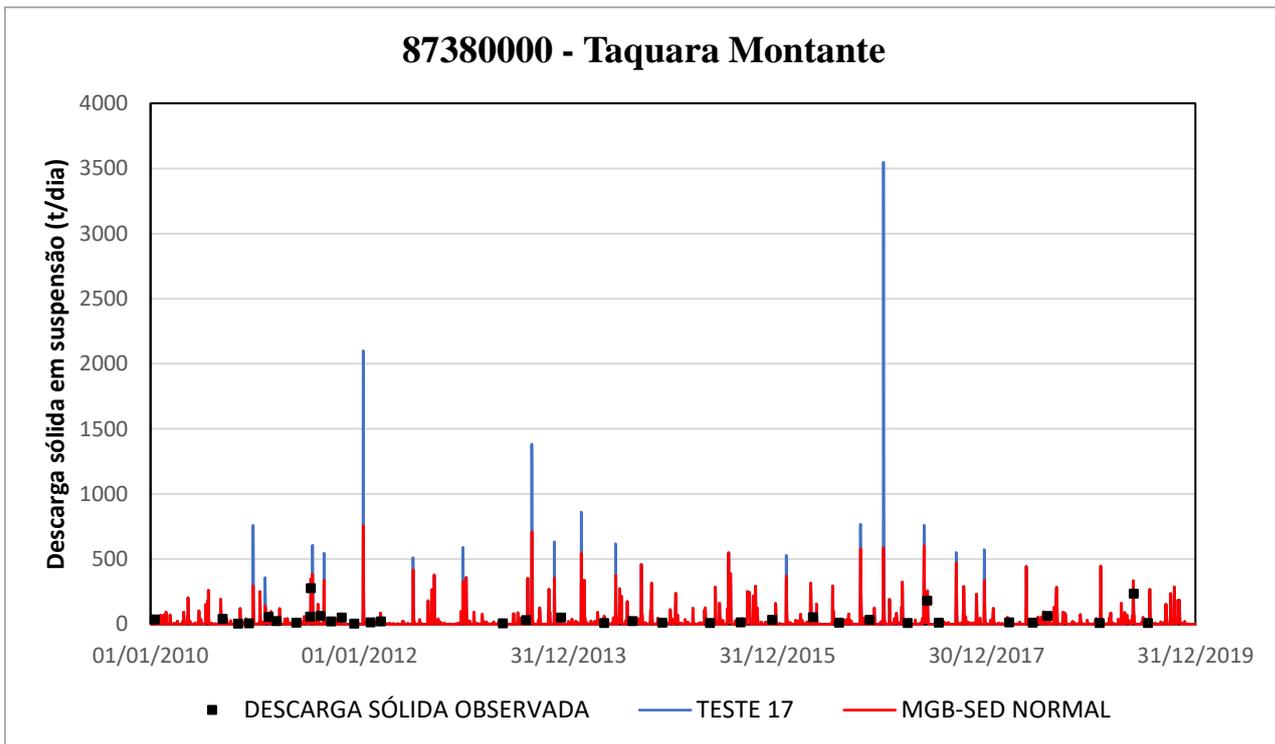
*Figura 66 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 60 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 20 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom.*



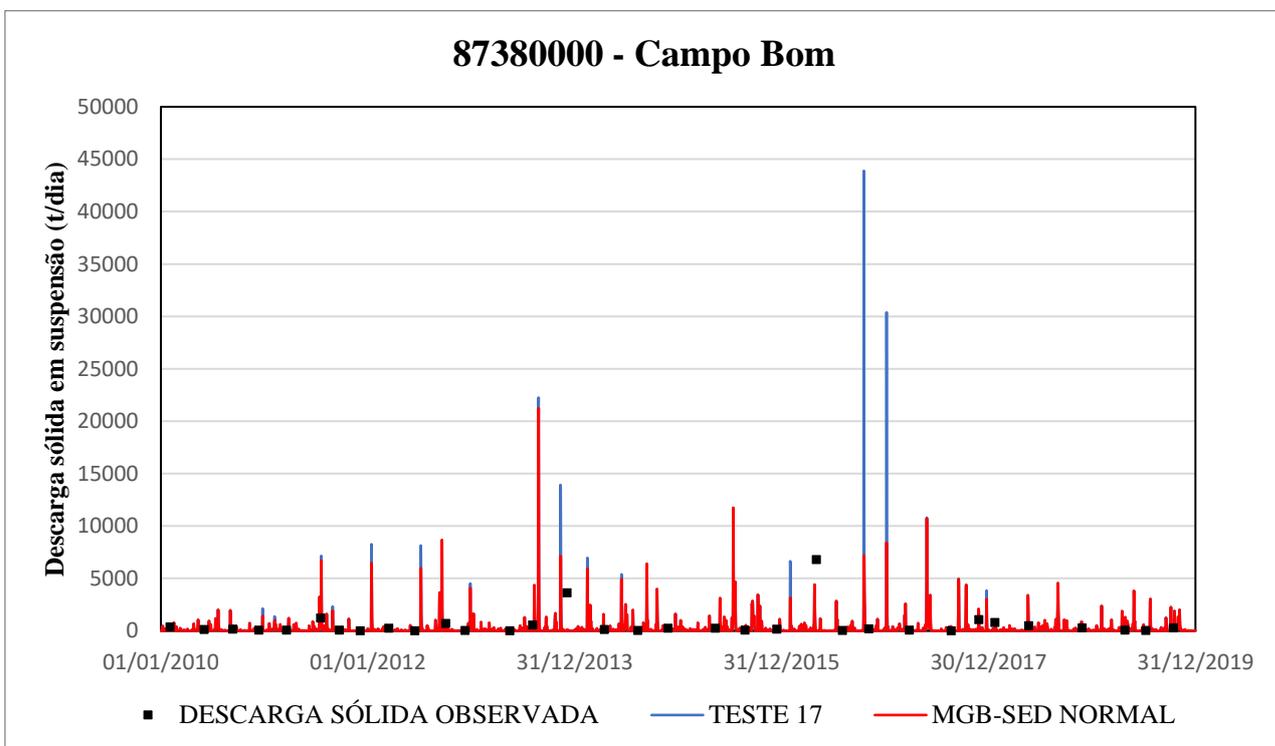
*Figura 67 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 80 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 15 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante.*



*Figura 68 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 80 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 15 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom.*



*Figura 69 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 80 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 20 vezes, no período de estudo, na estação Taquara Montante.*



*Figura 70 - Descarga sólida em suspensão observada e simulada nos modelos MGB-SED e MGB-SEDmm com gatilho pluviométrico maior que 80 mm, gatilho do fator LS acumulado maior que 80000 e multiplicador de 20 vezes, no período de estudo, na estação Campo Bom.*