



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



**EDUARDO NASCIMENTO MANARA**

**Simulação Hidrossedimentológica de Grandes Bacias com o  
Uso de Dados Medidos in Situ e Imagens de Sensoriamento  
Remoto: Estudo de caso da bacia do Rio Paraíba do Sul**

Porto Alegre  
Julho de 2019

**EDUARDO NASCIMENTO MANARA**

**Simulação Hidrossedimentológica de Grandes Bacias com o Uso de Dados Medidos  
in Situ e Imagens de Sensoriamento Remoto: Estudo de caso da bacia do Rio  
Paraíba do Sul.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO  
APRESENTADO AO INSTITUTO DE  
PESQUISAS HIDRÁULICAS DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO  
GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE ENGENHEIRO HÍDRICO.

**Orientador: Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan**

**Coorientador: Dr. Fernando Comerlato Scottá**

Porto Alegre  
Julho de 2019

### CIP - Catalogação na Publicação

Manara, Eduardo Nascimento

Simulação Hidrossedimentológica de Grandes Bacias com o Uso de Dados Medidos in Situ e Imagens de Sensoriamento Remoto: Estudo de caso da bacia do rio Paraíba do Sul / Eduardo Nascimento Manara. -- 2019. 233 f.

Orientador: Fernando Mainardi Fan.

Coorientador: Fernando Comerlato Scottá.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia Hidrica, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. modelagem Hidrossedimentológica. 2. Modelo MGB. 3. Sensoriamento Remoto. 4. Hidrologia de Grande Escala. 5. Rio Paraíba do Sul. I. Fan, Fernando Mainardi, orient. II. Scottá, Fernando Comerlato, coorient. III. Título.

**EDUARDO NASCIMENTO MANARA**

**Simulação Hidrossedimentológica de Grandes Bacias com o Uso de Dados Medidos  
in Situ e Imagens de Sensoriamento Remoto: Estudo de caso da bacia do Rio  
Paraíba do Sul.**

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Hídrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em julho de 2019 pela Comissão Avaliadora constituída pelos engenheiros:

Banca Examinadora:

.....  
Msc. Amanda Wajnberg Fadel – Hidróloga da Divisão de Planejamento e Gestão do Departamento de Recursos Hídricos da Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura (DIPLA/DRH/SEMA/RS)

.....  
Dr. Gean Paulo Michel, Prof em Recursos Hídricos e Saneamento Gean Paulo Michel –  
IPH/UFRGS

.....  
Msc. Hugo de Oliveira Fagundes – IPH/UFRGS

Conceito:

À memória de meu avô, Álvaro Antônio do  
Nascimento, um grande mestre, cuja trajetória de  
vida me motiva a sempre extrair o melhor de mim.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer por ter tido a grande oportunidade de nos últimos 5 anos ter estudado em uma das melhores universidades federais do Brasil, ter recebido um ensino de qualidade e excelência, e principalmente por estar inserido em um contexto repleto de pessoas incríveis que me ensinaram, motivaram e me ajudaram a entender e respeitar a importância e a nobreza de estudar o comportamento da água. Meus mais sinceros agradecimentos:

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Fan, por ser um excelente educador, por tamanha paciência e dedicação com seus alunos, por ser um exemplo a ser seguido. Sua maneira de lidar com as pessoas contagia e motiva muitos ao seu redor. Foi muito gratificante realizar um trabalho tão importante para minha através de sua orientação.

Ao meu coorientador, Dr. Fernando Scottá, pelos grandes ensinamentos em sensoriamento remoto e por ter demonstrado muito entusiasmo e dedicação para auxiliar na confecção do meu trabalho. Agradeço também à toda Divisão de Planejamento do Departamento de Recursos Hídricos do Estado, local onde aprendi muito sobre áreas que fazem parte da diversidade de ciências envolvendo o estudo e planejamento dos recursos hídricos.

À professora Ana Luiza Borges e aos professores Gean Michel, Anderson Ruhoff, Alfonso Risso e Rodrigo Paiva pelos excelentes ensinamentos transmitidos em sala de aula. Foi extremamente gratificante aprender e conviver com pessoas éticas e dedicadas como vocês.

A todos os meus amigos da graduação que estiveram comigo durante toda essa trajetória. Agradeço por todo apoio que recebi, pelo companheirismo e principalmente pela amizade que construímos nessa jornada, vocês sempre poderão contar comigo.

A todos os funcionários e colaboradores terceirizados da universidade. Pessoas que sempre mantiveram atitudes de respeito, gentileza e cortesia.

À minha namorada Nathalia Bennemann, por estar sempre comigo, me apoiar e entender os momentos difíceis que por ventura surgem na rotina intensa de um estudante de engenharia. Obrigado por fazer parte da minha história, por me ensinar e crescer junto comigo.

Por fim, agradeço à minha família, principalmente à minha mãe Maria Ivone Manara e ao meu falecido avô Álvaro Antônio do Nascimento. Não há dúvida de que todo o empenho que foi colocado na construção do meu caráter, da minha personalidade e da minha educação, representa a estrutura principal da realização deste trabalho.

*“A mais bela experiência que podemos ter é o mistério. É a emoção fundamental que está no berço da verdadeira arte e da verdadeira ciência”*

***Albert Einstein***

## RESUMO

MANARA, E, N. **Simulação Hidrossedimentológica de Grandes Bacias com o Uso de Dados Medidos in Situ e Imagens de Sensoriamento Remoto: Estudo de caso da bacia do Rio Paraíba do Sul.** Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Hídrica) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

### Resumo do Trabalho

Simulações hidrossedimentológicas são de difícil realização devido à escassez temporal e espacial de dados medidos, de grande importância para calibração e validação de modelos. Neste contexto, diversas técnicas vêm sendo desenvolvidas, nas últimas décadas, para estimativa de dados hidrológicos e sedimentológicos. Uma delas é a extração de uma correlação da reflectância espectral da faixa do vermelho (0,64-0,67  $\mu\text{m}$ ) de imagens de sensoriamento remoto com a concentração de sólidos em suspensão (CSS) em rios. Este trabalho prevê a utilização desta técnica como auxílio à verificação de um modelo em atual desenvolvimento, o modelo MGB-SED, acoplado ao modelo hidrológico MGB-IPH, capaz de representar a estimativa da geração de sedimentos na bacia e a simulação do transporte de sedimentos em rios de forma integrada à simulação hidrológica e hidráulica em grandes bacias. Como estudo de caso, para a simulação do modelo, foi escolhida a bacia do rio Paraíba do Sul, uma grande bacia, onde se encontram três importantes Estados do Brasil, que apresenta baixa quantidade disponível de dados medidos e seu rio principal apresenta uma grande largura, capazes de enquadrar facilmente pixels de imagens de satélites. Estes fatores somados justificam a escolha da bacia para realização desse trabalho. Os resultados obtidos através do modelo hidrológico MGB-IPH apresentaram-se promissores exibindo resultados considerados em mais de 60% das métricas avaliadas muito satisfatórios e insatisfatórios em menos de 10% das análises tanto para o período de calibração, quanto para o período de validação. Os dados de sedimentos disponíveis na bacia do rio Paraíba do Sul apresentam déficit em quantidade e disponibilidade temporal o que dificultou o processo de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED. A partir da inserção do ajuste parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  da equação de MUSLE no modelo foi possível gerar resultados capazes de representar os dados observados de forma satisfatório tanto no período de calibração quanto no período de validação dos dados. Os dados dos satélites *Landsat* foram obtidos através de uma nova plataforma de aquisição de dados (*Google Earth Engine*) que possibilitou rápida extração de dados para diferentes pontos pré-determinados que apresentaram altas correlações entre os dados de CSS simulados pelo modelo de sedimentos com valores superiores a 0,7, resultados estes superiores à própria correlação com os dados de concentração de sedimentos observados. A análise da correlação dos dados se mostrou promissora na avaliação do modelo para os períodos simulados promovendo maior confiança nas simulações a partir de uma disponibilidade de dados superior aos dados medidos e melhor distribuição temporal.

**Palavras-chave:** Modelagem Hidrossedimentológica, Modelo MGB, Sensoriamento Remoto, Hidrologia de Grande Escala, Rio Paraíba do Sul.

## ABSTRACT

MANARA, E, N. **Hydrosedimentological Simulation of Large Basins with Measured Data in Situ and Images of Remote Sensing: Case study of the Paraíba do Sul River basin.**

Diplomacy Work. (Graduation in Hydraulic Engineering) – Hydraulic Research Institute. Federal University of Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2019.

### Abstract of Work

Hydrosedimentological simulations are difficult to perform due to the temporal and spatial scarcity of measured data, of great importance for calibration and validation of models. In this context, several techniques have been developed in the last decades for the estimation of hydrological and sedimentological data. One of them is the extraction of a spectral reflectance correlation of the red range (0.64-0.67  $\mu\text{m}$ ) of remote sensing images with the concentration of suspended solids (CSS) in rivers. This work predicts the use of this technique as an aid to the verification of a model in the current development, the MGB-SED model, coupled with the MGB-IPH hydrological model, capable of representing the estimation of sediment generation in the basin and simulation of sediment transport in rivers integrated with hydrological and hydraulic simulation in large basins. As a case study, for the simulation of the model, the *Paraíba do Sul* river basin was chosen, a large basin, where three important states of Brazil are found, which presents a low available amount of measured data and its main river presents a great width, capable of easily framing satellite image pixels. These added factors justify the choice of the basin to carry out this work. The results obtained using the MGB-IPH hydrological model presented promising results with more than 60% of the metrics considered very satisfactory and unsatisfactory in less than 10% of the analyzes for both the calibration p and the validation period. The sediment data available in the *Paraíba do Sul* river basin show a deficit in quantity and temporal availability, which made it difficult to calibrate the sediment model MGB-SED sediment model. From the insertion of the adjustment parameters  $\alpha$  and  $\beta$  of the MUSLE equation in the model it was possible to generate results capable of representing the observed data in a satisfactory way both in the calibration period and in the validation period of the data. Data from the Landsat satellites were obtained through a new data acquisition platform (Google Earth Engine) that allowed the rapid extraction of data for different pre-determined points that presented high correlations between the CSS data simulated by the sediment model with higher values to 0.7, results higher than the correlation with the sediment concentration data observed. The analysis of the correlation of the data was promising in the evaluation of the model for the simulated periods, promoting greater confidence in the simulations from a data availability superior to the measured data and better temporal distribution.

**Key-Words:** Hydrosedimentological Modeling, MGB Model, Remote Sensing, Large Scale Hydrology, Paraíba do Sul River.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Trajetória de partículas sólidas ao longo da coluna de água de um rio. ....	31
Figura 2 – Ciclo Hidrossedimentológico.....	32
Figura 3 – Relações entre os fatores que contribuem para o estabelecimento de um equilíbrio em um canal de rio.....	33
Figura 4 – Ferramenta SIG Como Sistema de Apoio à Tomada de Decisões.....	38
Figura 5 – Espectro de Luz Visível. ....	40
Figura 6 - Radiação Total Refletida pela Água. ....	43
Figura 7 - Variação da Reflectância da Água de Acordo com a Variação da Concentração de Sedimentos em Suspensão para Solos Siltosos e Argilosos. ....	44
Figura 8 – Esquema dos processos de geração e propagação de sedimentos das mini-bacias e propagação de sedimentos na rede de drenagem. ....	56
Figura 9 - Mapa de localização da bacia do rio Paraíba do Sul.....	61
Figura 10 - Principais rios da bacia do Paraíba do Sul.....	62
Figura 11 - Relevo da bacia do rio Paraíba do Sul. ....	63
Figura 12 - Unidades de gestão da bacia do rio Paraíba do Sul. ....	63
Figura 13 - Fluxograma da metodologia empregada no estudo. ....	68
Figura 14 - Modelo Digital de Elevação para a região da bacia do rio Paraíba do Sul..	69
Figura 15 – Unidades de Resposta Hidrológica na bacia do rio Paraíba do Sul. ....	71
Figura 16 – Tipos de Solo FAO associados às classes de solo EMBRAPA. ....	71
Figura 17 – Localização dos postos pluviométricos selecionados para a modelagem hidrológica.....	72
Figura 18 – Localização das estações climatológicas utilizada para a composição das normais climatológicas da modelagem hidrológica. ....	73
Figura 19 – Localização dos postos fluviométricos existentes na bacia do rio Paraíba do Sul com longo período de dados contínuos observados.....	74
Figura 20 – Localização dos postos Sedimentométricos existentes na bacia do rio Paraíba do Sul.....	75
Figura 21 – Exemplo do layout de visualização do editor de código da plataforma Google Earth Engine .....	78
Figura 22 – Rede de drenagem sintética gerada a partir de um limar de área mínima de 10km <sup>2</sup> .....	80
Figura 23 – Discretização da bacia do rio Paraíba do Sul em ini-bacias e sub-bacias... 80	

Figura 24 – Localização das UHE’s e UEL’s na parte alta da bacia do rio Paraíba do Sul. .....	82
Figura 25 – Hidrogramas de vazões substituídas do Posto Paraíba do Sul – RN (58380001). .....	83
Figura 26 - Localização do posto fluviométrico cuja vazão observada foi substituída na modelagem hidrológica. ....	84
Figura 27 – Localização dos pontos de extração de dados de sensoriamento remoto na bacia do Rio Paraíba do Sul.....	88
Figura 28 – Comparativo entre duas imagens de satélite próximas ao exutório do rio Paraíba do Sul com visível diferença na concentração de sedimentos em suspensão....	89
Figura 29 - Localização dos postos sedimentométricos utilizados para calibração e validação do modelo de sedimentos MGB-IPH. ....	91
Figura 30 - Histograma de frequência da quantidade de estações para cada classe de performance de cada métrica de desempenho do período de calibração do modelo hidrológico MGB-IPH.....	101
Figura 31 - Espacialização dos resultados de Nash-Sutcliffe do modelo hidrológico MGB- IPH para o período de calibração. ....	102
Figura 32 - Espacialização dos resultados do logaritmo de Nash-Sutcliffe do modelo hidrológico MGB-IPH para o período de calibração.....	102
Figura 33 - Espacialização dos resultados do erro de volume do modelo hidrológico MGB-IPH para o período de calibração. ....	103
Figura 34 - Hidrograma simulado e observado no rio Paraíba do Sul no posto Campos - Ponte Municipal (58974000), para o período de calibração do modelo hidrológico MGB- IPH.....	104
Figura 35 - Hidrograma simulado e observado no rio Paraíba do Sul no posto Anta G (58630002), para o período de calibração do modelo hidrológico MGB-IPH.....	105
Figura 36 - Hidrograma simulado e observado no rio Muriaé no posto Cardozo Moreira (58960000), para o período de calibração do modelo hidrológico MGB-IPH.....	106
Figura 37 - Hidrograma simulado e observado no rio Pomba no posto Cataguases (58770000), para o período de calibração do modelo hidrológico MGB-IPH.....	106
Figura 38 - Hidrograma simulado e observado no rio Paraíbauna no posto juiz de fora – Jusante (58480500) para o período de calibração do modelo hidrológico MGB-IPH.	107

Figura 39 - Histograma de frequência da quantidade de estações para cada classe de performance de cada métrica de desempenho do período de validação do modelo hidrológico MGB-IPH.....	109
Figura 40 - Espacialização dos resultados de Nash-Sutcliffe do modelo hidrológico MGB-IPH para o período de validação. ....	110
Figura 41 - Espacialização dos resultados do logaritmo de Nash-Sutcliffe do modelo hidrológico MGB-IPH para o período de validação.....	110
Figura 42 - Espacialização dos resultados do erro de volume do modelo hidrológico MGB-IPH para o período de validação. ....	111
Figura 43 - Hidrograma simulado e observado no rio Paraíba do Sul no posto Campos - Ponte Municipal (58974000), para o período de validação do modelo hidrológico MGB-IPH.....	112
Figura 44 - Hidrograma simulado e observado no rio Pomba no posto Santo Antônio de Pádua II (58790002), para o período de validação do modelo hidrológico MGB-IPH.....	112
Figura 45 - Hidrograma simulado e observado no rio Muriaé no posto Cardozo Moreira (58960000), para o período de validação do modelo hidrológico MGB-IPH.....	113
Figura 46 - Hidrograma simulado e observado no rio Pomba no posto Cataguases (58770000), para o período de validação do modelo hidrológico MGB-IPH.....	113
Figura 47 - Hidrograma simulado e observado no rio Paraíba no posto juiz de fora – Jusante (58480500), para o período de validação do modelo hidrológico MGB-IPH...	114
Figura 48 - Histograma de frequência da quantidade de estações para cada classe de performance de cada métrica de desempenho do período de calibração do modelo de Sedimentos MGB-SED. ....	118
Figura 49 - Espacialização dos resultados de Nash-Sutcliffe para a Qss gerada pelo modelo MGB-SED para o período de calibração.....	119
Figura 50 - Espacialização dos resultados do erro de volume para a Qss gerada pelo modelo MGB-SED para o período de calibração.....	120
Figura 51 - Espacialização dos resultados da correlação de Pearson para a Qss gerada pelo modelo MGB-SED para o período de calibração.....	120
Figura 52 – Descarga sólida simulada e observada no rio Paraíba do Sul no posto Campos - Ponte Municipal (58974000), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED.....	121

Figura 53 – Concentração de sólidos em suspensão simulada e observada no rio Paraíba do Sul no posto Campos - Ponte Municipal (58974000), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	121
Figura 54 - Descarga sólida simulada e observada no rio Paraíba do Sul no posto Anta G (58630002), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	122
Figura 55 - Concentração de sólidos em suspensão simulada e observada no rio Paraíba do Sul no posto Anta G (58630002), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	123
Figura 56 - Descarga sólida simulada e observada no rio Muriaé no posto Cardozo Moreira (58960000), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	123
Figura 57 – Concentração de sólidos em suspensão simulada e observada no rio Muriaé no posto Cardozo Moreira (58960000), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	124
Figura 58 - Descarga sólida simulada e observada no rio Pomba no posto Cataguases (58770000), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	124
Figura 59 - Concentração de sólidos em suspensão simulada e observada no rio Pomba no posto Cataguases (58770000), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	125
Figura 60 - Descarga sólida simulada e observada no rio Paraíba no posto juiz de fora – Jusante (58480500), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	125
Figura 61 - Concentração de sólidos em suspensão simulada e observada no rio Paraíba no posto juiz de fora – Jusante (58480500), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	126
Figura 62 - Espacialização dos resultados do coeficiente de correlação de Pearson nos pontos de extração de dados selecionados para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	127
Figura 63 - Comparativo entre a CSS simulada, a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho e os dados observados de sedimentos para o ponto virtual referente ao posto 58974000 no rio Paraíba do Sul, no período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	128

Figura 64 - Comparativo entre a CSS simulada, a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho e os dados observados de sedimentos para o ponto virtual referente ao posto 58630002 no rio Paraíba do Sul, no período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	128
Figura 65 - Comparativo entre a CSS simulada, a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho e os dados observados de sedimentos para o ponto virtual referente ao posto 58960000 no rio Muriaé, no período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	129
Figura 66 - Comparativo entre a correlação da CSS simulada com os dados medidos e os dados extraídos das imagens de satélite para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	129
Figura 67 - Comparativo entre a CSS simulada e a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho no Ponto 3 de extração de dados para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	130
Figura 68 – Gráficos da correlação entre a CSS simulada e a reflectância da banda do vermelho para todos os pontos de extração de dados no período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	131
Figura 69 - Histograma de frequência da quantidade de estações para cada classe de performance de cada métrica de desempenho do período de validação do modelo de Sedimentos MGB-SED. ....	133
Figura 70 - Espacialização dos resultados de Nash sutcliffe para a Qss gerada pelo modelo MGB-SED para o período de validação. ....	134
Figura 71 - Espacialização dos resultados do erro de volume para a Qss gerada pelo modelo MGB-SED para o período de validação. ....	135
Figura 72 - Espacialização dos resultados da correlação de Pearson para a Qss gerada pelo modelo MGB-SED para o período de validação. ....	135
Figura 73 - Descarga sólida simulada e observada no rio Paraíba do Sul no posto Campos - Ponte Municipal (58974000), para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	136
Figura 74 – Concentração de sólidos em suspensão simulada e observada no rio Paraíba do Sul no posto Campos - Ponte Municipal (58974000), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	136

Figura 75 - Descarga sólida simulada e observada no rio Muriaé no posto Cardozo Moreira (58960000), para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	137
Figura 76 - Concentração de sólidos em suspensão simulada e observada no rio Muriaé no posto Cardozo Moreira (58960000), para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	138
Figura 77 - Descarga sólida simulada e observada no rio Pomba no posto Cataguases (58770000), para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED.....	138
Figura 78 - Concentração de sólidos em suspensão simulada e observada no rio Pomba no posto Cataguases (58770000), para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	139
Figura 79 - Descarga sólida simulada e observada no rio Paraíbuna no posto juiz de fora – Jusante (58480500), para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	139
Figura 80 - Concentração de sólidos em suspensão simulada e observada no rio Paraíbuna no posto juiz de fora – Jusante (58480500), para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	140
Figura 81 - Descarga sólida simulada e observada no rio Pomba no posto Santo Antônio de Pádua II (58720002), para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED.....	140
Figura 82 - Concentração de sólidos em suspensão simulada e observada no rio Pomba no posto Santo Antônio de Pádua II (58720002), para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	141
Figura 83 - Espacialização dos resultados do coeficiente de correlação de Pearson nos pontos de extração de dados selecionados para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	142
Figura 84 - Comparativo entre a CSS simulada, a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho e os dados observados de sedimentos para o ponto virtual referente ao posto 58974000 no rio Paraíba do Sul, no período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	143
Figura 85 - Comparativo entre a CSS simulada, a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho e os dados observados de sedimentos para o ponto virtual referente	

ao posto 58960000 no rio Muriaé, no período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	143
Figura 86 - Comparativo entre a correlação da CSS simulada com os dados medidos e os dados extraídos das imagens de satélite para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	144
Figura 87 - Comparativo entre a CSS simulada e a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho no Ponto 2 de extração de dados para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	144
Figura 88 - Gráficos da correlação entre a CSS simulada e a reflectância da banda do vermelho para todos os pontos de extração de dados no período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	146
Figura 89 – Comparativo entre as correlações de Person obtidas entre os dados simulados e os dados extraídos de imagens de satélite para os períodos de calibração e validação do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	148
Figura 90 - Estimativa da concentração média de argila por trecho de rio da bacia do rio Paraíba do Sul. ....	149
Figura 91 - Estimativa da concentração média de silte por trecho de rio da bacia do rio Paraíba do Sul. ....	150
Figura 92 - Estimativa da concentração média de sedimentos em suspensão por trecho de rio da bacia do rio Paraíba do Sul. ....	150
Figura 93 - Estimativa da descarga sólida média diária de sedimentos em suspensão por trecho de rio da bacia do rio Paraíba do Sul. ....	151
Figura 94 - Estimativa da descarga sólida média anual de sedimentos em suspensão por trecho de rio da bacia do rio Paraíba do Sul. ....	152
Figura 95 - Mapa da estimativa da produção de sedimentos finos (argila e silte) em toneladas por ano para a bacia do rio Paraíba do sul. ....	153
Figura 96 - Mapa da estimativa da produção de argila em toneladas por ano para a bacia do rio Paraíba do sul. ....	154
Figura 97 - Mapa da estimativa da produção de silte em toneladas por ano para a bacia do rio Paraíba do sul. ....	154
Figura 98 – Mapa da estimativa da produção de sedimentos totais (argila, silte e areia) em toneladas por ano para a bacia do rio Paraíba do sul. ....	155

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Alguns dos Principais Satélites de Aquisição de Dados de Sensoriamento Remoto. ....	41
Tabela 2 – Classificação e Estrutura Geral dos Modelos Hidrossedimentológicos. ....	46
Tabela 3 – Descrição das Principais Ferramentas do IPH-Hydro Tools. ....	49
Tabela 4 – Dados Hidrológicos de Entrada do Modelo MGB-IPH.....	51
Tabela 5 – Períodos definidos de calibração e validação do modelo hidrológico.....	81
Tabela 6 – Postos fluviométricos utilizados para calibração e validação do modelo MGB-IPH na bacia do Rio Paraíba do Sul. ....	84
Tabela 7 – Pontos virtuais definidos para extração de dados dos satélites Landsat.....	88
Tabela 8 - Postos sedimentométricos utilizados para calibração e validação do modelo MGB-IPH na bacia do Rio Paraíba do Sul. ....	90
Tabela 9 – Tipos de solo FAO presentes na bacia do Rio Paraíba Sul correlacionados com os solos da EMBRAPA e as Unidades de Resposta Hidrológicas utilizadas na modelagem, e as porcentagens de areia, silte, argila e carbono orgânico de cada solo..	92
Tabela 10 - Referências de valores do fator C da MUSLE. ....	93
Tabela 11 - Faixas de Avaliação Adotadas para os Modelos Hidrológico e de Sedimentos. ....	98
Tabela 12 – Métricas de desempenho para o período de calibração do modelo Hidrológico MGB-IPH. ....	100
Tabela 13 - Métricas de desempenho para o período de validação do modelo Hidrológico MGB-IPH. ....	108
Tabela 14 - Comparação das métricas de desempenho do modelo hidrológico MGB-IPH para o período de calibração e validação.....	114
Tabela 15 – Métricas de desempenho para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED considerando a Descarga Sólida ( $Q_{ss}$ ) e concentração de sedimentos em suspensão (CSS). ....	117
Tabela 16 - Índice de correlação de Pearson entre a CSS simulada e a reflectância da banda espectral da faixa do vermelho dos satélites Landsat nos pontos de extração de dados selecionados para o período de calibração do modelo de sedimentos MB-SED. ....	126

Tabela 17 - Métricas de desempenho para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED considerando a Descarga Sólida ( $Q_{ss}$ ) e concentração de sedimentos em suspensão (CSS). .....	132
Tabela 18 - Índice de correlação de Pearson entre a CSS simulada e a reflectância da banda espectral da faixa do vermelho dos satélites Landsat nos pontos de extração de dados selecionados para o período de validação do modelo de sedimentos MB-SED. ....	141
Tabela 19 – Comparação entre as métricas de desempenho para os períodos de calibração e validação do modelo de sedimentos MGB-SED. ....	147
Tabela 20 – Comparativo entre a descarga sólida simulada e apresentada em AGEVAP, 2014. ....	152

# SUMÁRIO

<b>1. APRESENTAÇÃO.....</b>	<b>21</b>
<b>1.1 Introdução .....</b>	<b>21</b>
<b>1.2 Justificativa.....</b>	<b>23</b>
<b>1.3 Objetivos .....</b>	<b>24</b>
<b>1.4 Estrutura do Texto.....</b>	<b>24</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>26</b>
<b>2.1 Motivação aos Estudos e à Modelagem Hidrossedimentológica .....</b>	<b>26</b>
<b>2.2 Dinâmica dos Sedimentos.....</b>	<b>28</b>
<b>2.3 Equações matemáticas utilizadas para a representação dos processos Hidrossedimentológicos .....</b>	<b>33</b>
<b>2.4 Ferramentas de Geoprocessamento para Simulações Hidrossedimentológicas e Tomada de Decisões .....</b>	<b>37</b>
<b>2.5 Sensoriamento Remoto Aplicado à Hidrossedimentologia .....</b>	<b>39</b>
<b>2.6 Modelos de Geração e do Transporte de Sedimentos.....</b>	<b>45</b>
<b>2.7 O Modelo de Grandes Bacias (MGB) .....</b>	<b>48</b>
2.7.1 Pré-Processamento de Dados - IPH-Hydro Tools .....	49
2.7.2 Modelo Hidrológico MGB-IPH .....	50
2.7.3 Modelo de Sedimentos MGB-SED .....	52
2.7.3.1 <i>Módulo Bacia</i> .....	52
2.7.3.2 <i>Módulo Rio</i> .....	57
2.7.3.3 <i>Módulo Planície</i> .....	58
<b>2.8 Comentários Finais Sobre a Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>59</b>
<b>3. ÁREA DE ESTUDO: A BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL.....</b>	<b>60</b>
<b>3.1 Caracterização Geral da Bacia.....</b>	<b>61</b>
<b>3.2 Caracterização dos Impactos Hidrossedimentológicos da Bacia .....</b>	<b>64</b>
<b>3.3 Justificativa de Escolha da Bacia Como Estudo de Caso.....</b>	<b>65</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>67</b>

<b>4.1</b>	<b>Aquisição do Banco de Dados .....</b>	<b>69</b>
4.1.1	Modelo Digital de Elevação e Dados do Solo.....	69
4.1.2	Dados Medidos .....	72
4.1.3	Dados de Imagens de Satélite.....	75
<b>4.2</b>	<b>Preparação e Calibração do Modelo Hidrológico.....</b>	<b>79</b>
4.2.1	Pré-Processamento de Dados.....	79
4.2.2	Definição dos Dados Hidrológicos e Meteorológicos.....	81
4.2.3	Definição dos Parâmetros Fixos .....	85
4.2.4	Calibração e Validação do modelo Hidrológico.....	86
<b>4.3</b>	<b>Preparação e calibração do modelo de sedimento .....</b>	<b>86</b>
4.3.1	Extração da concentração de sedimentos em suspensão a partir de imagens de sensoriamento remoto.....	87
4.3.2	Definição dos Dados de Sedimento.....	89
4.3.3	Definição dos parâmetros Iniciais da MUSLE.....	91
4.3.3.1	<i>Fator de Erodibilidade do Solo (K)</i> .....	92
4.3.3.2	<i>Fator de Uso e Cobertura do Solo (C)</i> .....	93
4.3.4	Introdução dos Parâmetros $\alpha$ e $\beta$ no Modelo MGB-SED .....	94
4.3.5	Calibração e Validação do Modelo de Sedimentos.....	94
<b>4.4</b>	<b>Verificação dos Resultados .....</b>	<b>95</b>
4.4.1	Métricas de Desempenho Utilizadas .....	95
4.4.1.1	<i>Coefficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NASH)</i> .....	95
4.4.1.2	<i>Coefficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe Aplicado ao Logaritmo (NASHLog)</i> .....	96
4.4.1.3	<i>Porcentagem de Erro de Volume (<math>\Delta V</math>)</i> .....	96
4.4.1.4	<i>Coefficiente de Correlação de Pearson (r)</i> .....	97
4.4.2	Faixas de Qualidade das Métricas de Desempenho.....	97
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>99</b>

<b>5.1</b>	<b>Modelo Hidrológico .....</b>	<b>99</b>
5.1.1	Resultados da Calibração.....	99
5.1.1.1	<i>Métricas de Desempenho .....</i>	99
5.1.1.2	<i>Hidrogramas .....</i>	104
5.1.2	Resultados da Validação.....	107
5.1.2.1	<i>Métricas de desempenho .....</i>	107
5.1.2.2	<i>Hidrogramas .....</i>	111
5.1.3	Calibração x Validação do Modelo Hidrológico.....	114
<b>5.2</b>	<b>Modelo de Sedimentos .....</b>	<b>116</b>
5.2.1	Parâmetros Finais da MUSLE .....	116
5.2.2	Resultados da Calibração.....	117
5.2.2.1	<i>Métricas de Desempenho .....</i>	117
5.2.2.2	<i>Sedimentogramas .....</i>	121
5.2.2.3	<i>Correlação com a Reflectância da Banda do Vermelho .....</i>	126
5.2.3	Resultados da Validação.....	132
5.2.3.1	<i>Métricas de Desempenho .....</i>	132
5.2.3.2	<i>Sedimentogramas .....</i>	136
5.2.3.3	<i>Correlação com a Reflectância da Banda do Vermelho .....</i>	141
5.2.4	Calibração X Validação do Modelo de Sedimentos.....	147
<b>5.3</b>	<b>Análise Hidrossedimentológica da Bacia do Rio Paraíba do Sul .....</b>	<b>148</b>
5.3.1	Estimativa da concentração média de sedimentos por trechos de rio.....	148
5.3.2	Estimativa da descarga sólida média de longo período por trecho de rio	151
5.3.3	Estimativa da produção de sedimentos anual na bacia.....	153
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>156</b>
<b>7.</b>	<b>RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>160</b>

<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>162</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>174</b>
<b>Apêndice I – Rotina de Extração de dados do Google Engine.....</b>	<b>174</b>
<b>Apêndice II – Parametros Fixos do Modelo Hidrológico MGG-IPH .....</b>	<b>177</b>
<b>Apêndice III – Parâmetros Calibráveis dos Modelos MGB-IPH e MGB-SED. ....</b>	<b>178</b>
<b>Apêndice III - Hidrogramas de Calibração e Validação do Modelo Hidrológico MGB-IPH .....</b>	<b>195</b>
<b>Apêndice IV - Comparativos Entre a CSS Simulada e a Reflectância Espectral da Superfície da Banda do Vermelho.....</b>	<b>226</b>

## 1. APRESENTAÇÃO

### 1.1 Introdução

Os termos erosão e sedimentação envolvem processos dinâmicos de desagregação, transporte e deposição de partículas que constituem o que conhecemos como sedimentos (CARVALHO *et al.*, 2000). Esses são processos que ocorrem naturalmente em escalas de tempo geológicas, na qual a ação do intemperismo físico-químico, ao longo do tempo, degrada as rochas gerando partículas sólidas que interagem com o ciclo hidrológico sendo transportadas e depositadas gerando novas rochas, formando e modificando o relevo.

Segundo Carvalho *et al.* (2000), a ação humana possui uma drástica influência na erosão do solo, à medida que os usos do solo são modificados de forma a deixar o solo mais exposto à ação de intempéries, as taxas de erosão podem apresentar valores muitas vezes maiores do que os que ocorrem naturalmente.

A agravação dos processos de erosão é um fenômeno relevante para os recursos naturais, gerando reflexos significativos ao meio ambiente e urbano através de processos de assoreamento de rios e reservatórios, redução da qualidade da água de córregos e rios, redução de solo fértil, dificuldade no tratamento de água, entre outros. Assim, compreender a dinâmica de processos hidrológicos aliados aos processos sedimentológicos é essencial, de forma que uma vez conhecidas estas informações, seja possível aplicar bons instrumentos de gestão na área, a nível de manejo de recursos hídricos e uso e ocupação do solo.

Embora os processos hidrossedimentológicos tenham acompanhado as civilizações, somente há pouco mais de cem anos que começaram a existir estudos com bases mais teóricas. Após a década de 1930, as pesquisas tomaram maior impulso. Apesar dos estudos estarem gerando grande quantidade de dados e conhecimentos, muito ainda há de ser feito para que seja obtida a exatidão e precisão desejadas nas previsões e avaliações (CARVALHO, 2008).

Neste contexto, a utilização de softwares de modelagem hidrológica associados à produção de sedimentos torna-se uma alternativa viável. De acordo com Buarque (2015), os modelos matemáticos de erosão e transporte de sedimentos mais complexos representam os processos hidrossedimentológicos por bases físicas e apresentam condições específicas que

apresentam resultados mais precisos em áreas de pequena escala. Segundo o autor, surgem modelos mais simplificados, baseados em relações empíricas e conceituais que têm sido comumente utilizado em grandes regiões, porém as simplificações envolvidas no processo os impedem de representar diversos efeitos hidrodinâmicos que ocorrem em grandes bacias, tais como efeitos de remanso e das planícies de inundação no retardo e amortecimento de hidrogramas, que controlam não só o regime de vazões mas também a dinâmica de sedimentos.

A partir da necessidade consolidada de desenvolvimento de modelos matemáticos, que estimem a geração de sedimentos e o seu transporte nos trechos de rios, capazes de representar a hidráulica complexa do sistema de drenagem de grandes bacias, foi desenvolvido o modelo de sedimentos de grande escala (BUARQUE, 2015), acoplado ao modelo Hidrológico MGB-IPH (COLLISCHONN *et al.*, 2007), capaz de representar os processos hidrossedimentológicos em redes de drenagem de grande escala. O modelo desenvolvido por Buarque (2015) foi aplicado, inicialmente, à bacia do rio Madeira, afluente do rio Amazonas e até então usado para simular poucas bacias, sendo assim interessante avaliar o desempenho do modelo para outras grandes bacias, com características físicas distintas, como estudo de caso.

No Brasil, apesar do número de dados de campo disponíveis (chuva, vazão, nível, concentração de sólidos em suspensão etc.) ser relativamente diversificado, sua cobertura para aplicação em grandes bacias ainda apresenta descontinuidades no tempo e no espaço (BUARQUE, 2015). Por outro lado, as aplicações de modelagem em grandes bacias têm sido facilitadas pelo surgimento de novas técnicas de aquisição de dados, que permitem realizar a calibração e validação de modelos. Uma delas é a extração de uma correlação da reflectância espectral da faixa do vermelho (0,64 – 0,67  $\mu\text{m}$ ) de imagens de sensoriamento remoto com a concentração de sólidos em suspensão (CSS) em rios (FAGUNDES *et al.*, 2017).

De interesse para o presente trabalho, a bacia do rio Paraíba do Sul se situa em uma região de relevo acidentado, com poucas áreas planas, caracteriza-se por uma drástica redução da cobertura florestal natural. A bacia apresenta formas de uso do solo inadequadas às condições de relevo e solo que configuram um cenário generalizado de processos intensos de erosão, com estágios avançados de degradação em diversas áreas da bacia. A bacia sofre com intensa atividade de mineração (principalmente extração de argila e areia) e expansão urbana, processos que somados são responsáveis por erosão e degradação dos corpos de água. Em muitas regiões da bacia há um processo de erosão muito acelerado que torna expressiva a

quantidade de sedimento aportada ao rio Paraíba do Sul resultando em altos valores de turbidez e assoreamento de reservatórios (AGEVAP, 2007; INEA, 2010).

## 1.2 Justificativa

De forma sucinta a justificativa para a escolha da realização deste trabalho se encontra dividida em três tópicos centrais.

- O modelo MGB-SED desenvolvido por Buarque (2015), foi até então simulado para poucas bacias como estudo de caso, sendo elas a bacia do rio Madeira (BUARQUE, 2015; BUARQUE *et al.*, 2016), a bacia da laguna dos Patos (ROSSONI, 2017) e a Bacia do Rio Doce (FAGUNDES, 2018; FAGUNDES *et al.*, 2017a; FAGUNDES *et al.*, 2017b). Sendo assim interessante simulá-lo para outras grandes regiões hidrográficas brasileira e avaliar se os resultados obtidos são satisfatórios.
- Devido à baixa disponibilidade de dados medidos de sedimentos *in situ* utilizar diferentes metodologias que se proponham a auxiliar a calibração e validação de modelos hidrossedimentológicos se torna uma métrica interessante. Sendo assim analisar a correlação da concentração de sólidos em suspensão (CSS) com a reflectância espectral da banda do vermelho de imagens de sensoriamento remoto é de grande valia aos estudos de sedimentologia tanto para auxiliar na modelagem e melhoria de resultados simulados quanto para contribuir para a aceitação da metodologia.
- A Bacia do rio Paraíba do Sul, foi escolhida como objeto de estudo deste trabalho por ser uma grande bacia que contempla três estados brasileiros densamente povoados e de grande importância no cenário nacional. A Bacia apresenta, considerando sua grande importância e extensão e baixa quantidade de dados disponíveis de medições de sedimento e o rio Paraíba do Sul possui uma grande largura, capaz de enquadrar facilmente um pixel de imagens de satélite, sendo assim um ambiente interessante para aplicação do modelo e da métrica de obtenção de dados a partir de imagens de satélite.

### 1.3 Objetivos

O objetivo do trabalho é avaliar a aplicação do modelo hidrossedimentológico MGB-SED, contando como estudo de caso uma grande região hidrográfica do Brasil, a bacia do rio Paraíba do Sul.

O trabalho possui como objetivos específicos os itens que seguem:

- Avaliar, para a bacia de estudo, se os resultados obtidos de vazões simuladas a partir do modelo hidrológico (MGB-IPH) apresentam boa correlação com dados medidos de vazão de postos fluviométricos.
- Compreender se é possível extrair uma correlação entre concentração de sólidos em suspensão (CSS) simulada pelo modelo e a reflectância espectral da faixa do vermelho de imagens de sensoriamento remoto.
- Avaliar se é possível realizar a calibração e validação do modelo hidrossedimentológico a partir dos dados medidos contando com a verificação do modelo a partir dos dados obtidos de produtos de sensoriamento remoto.
- Realizar uma análise hidrossedimentológica da bacia de estudo a partir dos resultados obtidos do modelo de sedimentos, considerando concentrações médias de sedimentos em suspensão, descarga sólida anual e a produção de sedimentos da bacia.

### 1.4 Estrutura do Texto

Apresenta-se neste trabalho uma simulação hidrossedimentológica em grandes bacias. A simulação conta com a análise da calibração e validação da modelagem com o auxílio de imagens de sensoriamento remoto e de dados medidos *in situ*.

Inicialmente, no capítulo 1, faz-se uma introdução acerca da temática envolvida na simulações, os principais aspectos motivadores e os principais objetivos a serem alcançados a partir deste estudo.

No capítulo 2, exibe-se uma revisão bibliográfica na qual é abordada a motivação aos estudos e à modelagem hidrossedimentológica, explicações sobre os processos de produção e

transporte de sedimentos, as equações matemáticas governantes dos processos hidrossedimentológicos, a importância do uso de ferramentas de geoprocessamento neste contexto, as aplicações de sensoriamento remoto na hidrossedimentologia, um panorama geral sobre os modelos hidrossedimentológicos e suas aplicações, e um tópico final destinado somente ao esclarecimento teórico do modelo de grandes bacias (MGB), contemplando o pré-processamento de dados com o *IPH-Hydro Tools*, O modelo hidrológico MGB-IPH e o Modelo de sedimentos MGB-SED, principal objeto de estudo deste trabalho.

No capítulo 3, apresenta-se a área de estudo, abordando a caracterização geral da bacia, seus impactos relativos à sua hidrossedimentologia e uma justificativa à escolha da bacia como estudo de caso do trabalho.

No capítulo 4, são descritos os materiais e a metodologia utilizada para a simulação. Inicialmente há um tópico respectivo ao processo de aquisição de dados (hidrológicos, meteorológicos, sedimentológicos, climáticos, imagens de sensoriamento remoto e dados de solo). Seguindo, há a preparação e calibração do modelo hidrológicos, descrevendo, de forma reproduzível, todo o processo de pré-processamento de dados, simulação, calibração e validação do modelo. Por fim há a preparação e calibração do modelo de sedimentos, descrevendo o processo de extração da concentração de sedimentos em suspensão (CSS) da reflectância espectral da banda do vermelho de imagens de sensoriamento remoto, a definição dos parâmetros iniciais da equação MUSLE e a calibração e validação do modelo.

Nos capítulos finais estão exibidas as análises dos resultados obtidos, conclusões indicando se os objetivos do trabalho foram atingidos e possíveis recomendações para futuros estudos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma das etapas mais importantes de um projeto de pesquisa é a revisão de literatura, referindo-se e trazendo fundamentação teórica do que será abordado para tratar do tema de estudo escolhido (SILVA & MENEZES, 2005). Segundo Luna (1997) a revisão bibliográfica determina o conhecimento do “estado da arte” no qual o pesquisador procura demonstrar através da literatura já publicada o que já sabe sobre o tema, quais são as lacunas existentes e quais são os principais tópicos teóricos e metodológicos necessários para compor o trabalho. Apresenta-se a seguir um breve resumo dos principais tópicos abordados neste estudo deixando clara a relevância dos estudos em hidrossedimentologia, a importância da modelagem de sedimentos e a necessidade do desenvolvimento de métricas alternativas à geração de dados para calibração e validação de modelos.

### 2.1 Motivação aos Estudos e à Modelagem Hidrossedimentológica

Durante o desenvolvimento das civilizações há um aumento significativo da produção de sedimentos da bacia hidrográfica devido a diversos fatores de origem antrópica. Em bacias rurais, o cultivo do solo o deixa periodicamente exposto, alterando a estrutura da camada superficial do solo, tornando-o menos resistente o que resulta em um grande aumento da produção de sedimentos. O mesmo pode ocorrer em bacias urbanas a partir da alteração dos usos do solo, áreas de campos, florestas ou até banhados são ocupadas na periferia das cidades por loteamentos que promovem intensa retirada da cobertura vegetal do solo, movimentação de volumes de terra e desestruturação da camada superficial do solo (TUCCI & COLLISCHONN, 1998).

Diversos os problemas derivados do sedimento no meio ambiente têm origem a partir do aumento da erosão, processo inicial do ciclo do sedimento. A erosão é capaz de gerar danos severos ao ambiente, em áreas de cabeceira, a erosão é capaz de provocar a destruição de nascentes, em zonas agrícolas, promove a remoção da camada fértil e o empobrecimento do solo. A erosão do solo gera o desprendimento e escorregamento de terras e taludes podendo gerar danos e destruições em obras que podem vir a gerar mortes (CARVALHO, 2008).

O sedimento erodido pode ser transportado pelos cursos de água, causando danos à qualidade da água, as partículas em suspensão degradam o uso consumptivo da água, aumentando o custo de tratamento e imprópriando a água para abastecimento, recreação, consumo industrial e a manutenção da vida aquática (CARVALHO, 2008). Os sedimentos em suspensão impedem a penetração de luz e do calor dificultando a atividade fotossintética, que podem gerar grande degradação ambiental, diminuição das populações de peixes e salubridade dos corpos d'água (CARVALHO, 2008). Adicionalmente, produtos químicos e lixo se encontram associados ao sedimento. Dessa forma, as partículas de sedimento agem potencializando problemas causados por pesticidas, agentes químicos decorrentes de lixo, resíduos tóxicos, nutrientes, patógenos, vírus etc. (CARVALHO *et al.*, 2000).

Comumente há a presença de barramentos nos corpos d'água, os sedimentos ao chegarem em reservatórios acumulam-se a montante das barragens e modificam o fluxo natural e o carreamento de sedimentos para jusante (CARVALHO *et al.*, 2000). A deposição dos sedimentos nos reservatórios reduz a capacidade de regularização de vazões e seus benefícios no fornecimento de água e controle de inundações, além dos benefícios da energia elétrica, navegação, recreação e meio ambiente que dependem da liberação de água dos reservatórios (MORRIS & FAN, 1998).

De acordo com Vanoni (1977), o estudo da sedimentação é de vital interesse na conservação, desenvolvimento e utilização dos solos e dos recursos hídricos, pois sem esses recursos a humanidade não pode existir, e sendo eles de baixa qualidade ou de insuficiente qualidade, certamente o destino não será sadio. Conforme Carvalho (2008), há a necessidade de que sejam elaboradas medidas adequadas de conservação dos recursos naturais baseado em um real conhecimento do estado e do potencial de tais recursos. Desta maneira, conhecer os rios é uma necessidade que cresce cada vez mais.

Há uma necessidade premente de promover estudos referentes à sedimentologia em todas as suas fases: erosão, transporte sólido e o assoreamento. Divulgar trabalhos afins, capacitar pessoas, ampliar a rede sedimentométrica, operar adequadamente, informatizar, melhorar os laboratórios, normalizar o processamento dos dados, criar um banco de dados, são providências que devem ser tomadas urgentemente (CARVALHO 2008).

Nesse sentido, é importante o uso de modelos matemáticos para a análise e interpretação de informações referentes aos diversos usos do solo e suas consequências para o processo erosivo e o meio ambiental. Também, salienta-se que, a análise das interações entre as variáveis

da erosão dificilmente pode ser feita de maneira experimental, o que por consequência torna a simulação computacional uma forma prática de investigar os impactos provenientes de diferentes usos do solo (LELIS *et al.*, 2010).

A grande maioria dos modelos desenvolvidos até então, que simulam erosão e a qualidade da água em bacias hidrográficas, são inadequados para diferentes escalas de aplicação, eles podem sofrer uma série de problemas, que incluem, parametrização excessiva, dados de entrada irrealistas, instabilidades referentes às condições locais e inadequação a testes e resultados de performance (MERRITT *et al.*, 2003).

Segundo Buarque (2015), os modelos de sedimentos se encontram, tradicionalmente, em duas linhas de pesquisa. A primeira com estudos voltados para a perda de solo e a segunda com interesse na propagação e no transporte de sedimentos na bacia, porém, esses processos são complementares e ocorrem de maneira simultânea, aumentando a necessidade de integrar ambos os processos nas simulações matemáticas.

## 2.2 Dinâmica dos Sedimentos

A erosão do solo é um processo de duas fases que consiste no desprendimento de partículas individuais do solo e o seu transporte por agentes erosivos como a água e o vento. A partir do momento em que não há energia suficiente para promover o transporte das partículas ocorre o surgimento de uma terceira fase, a deposição das partículas desprendidas do solo (MORGAN, 2005).

Os processos erosivos estão intimamente relacionados aos caminhos percorridos pela água através da cobertura vegetal e sobre a superfície do solo (MORGAN, 2005), sendo assim o ciclo hidrossedimentológico age de forma concomitante com uma parcela do ciclo da água. A dinâmica dos sedimentos é complicada e depende de vários fatores. Num estudo geral é necessário considerar as formas de erosão, os agentes erosivos e os tipos de erosão (CARVALHO, 2008).

A Erosão, segundo Carvalho (2008), é explicada pelo conceito em Geologia de “rochas sedimentares”. O Intemperismo é o grande responsável pela formação do solo. As rochas e os minerais formados sofrem a ação da água, ar, calor solar, seres vivos, e lentamente vão se modificando e se transformando em corpos totalmente diferentes. Esses Agentes modificam

cor, brilho, composição química, tenacidade e outras características, agindo mecânica e quimicamente. Carregados pelas águas ou pelos ventos, os sedimentos acabam por se depositar nas depressões, nas planícies, nos rios, nos mares e nos lagos, dando origem às rochas sedimentares (CARVALHO, 2008). Esses processos configuram o que conhecemos com o ciclo hidrossedimentológico.

Segundo Carvalho (2008), há duas formas de erosão do solo: a geológica, aquela que acontece de maneira natural sem intervenção humana, e a acelerada, dita antrópica, aquela provocada pela ação humana na má gestão dos usos do solo. A erosão é causada, ou afetada, por elementos do meio físico que se constituem como agentes erosivos. Esses podem ser ativos, como a água, a temperatura, a radiação solar, o vento, o gelo, a neve, ou passivos, como a topografia, os tipos de solo, a cobertura vegetal e as práticas antrópicas (CARVALHO, 2008). A água é o principal agente erosivo, responsável por desencadear todos os processos de erosão. Segundo Carvalho (2008) as principais formas de erosão são:

- Erosão eólica: causado pela ação do vento, provocando o movimento das partículas pelo ar e pela superfície do terreno.
- Erosão fluvial: é aquela processada de modo contínuo e espontâneo pela ação das correntes dos rios. Neste processo pode ocorrer a erosão de leito e das margens, aprofundando e alargando as seções dos rios.
- Erosão por remoção de massa: corresponde a movimentos de uma quantidade substancial de materiais das formações superficiais e de rochas sob a influência combinada da gravidade e da saturação de água no solo.
- Erosão hídrica superficial: erosão causada pela ação da água no terreno a ser erodido.

Dentro do contexto da erosão hídrica superficial, segundo Carvalho (2008), há ainda subdivisões de acordo com os itens que seguem:

- Erosão pluvial: é produzida pelo impacto das gotas de chuva ao caírem sobre superfícies desprotegidas, conhecida como rainsplash (MORGAN, 2005). O golpe das gotas afeta primeiramente a estrutura da capa superficial do solo, predispondo a um desprendimento das partículas, que em seguida serão mobilizadas pelo escoamento.

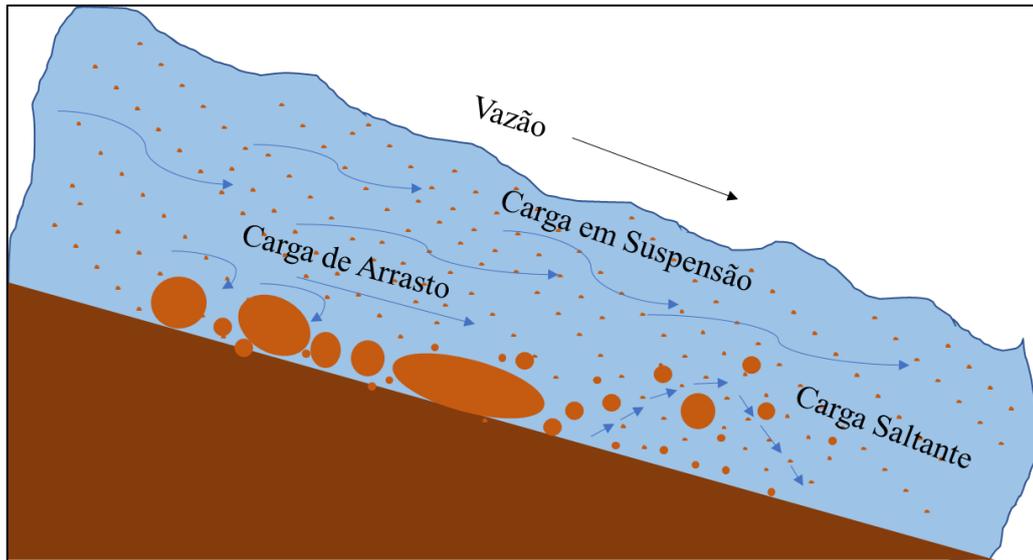
- Erosão laminar: se processa durante fortes eventos de chuvas, quando solo superficial se encontra saturado, promovendo um desgaste suave, uniforme e distribuído na camada superficial do solo em toda a sua extensão.
- Erosão por escoamento em sulcos ou ravinas: é produzida por filetes de água que se dividem em braços que se espalham e se juntam constantemente. A água escoar pelo terreno formando depressões que pouco a pouco aumentam e se tornam sulcos e posteriormente ravinas. Esse tipo de erosão é generalizado e existe mesmo sob a cobertura vegetal, sendo um agente de transporte do material já desagregado pela chuva ou outros agentes.
- Erosão por escoamento intenso: semelhante ao anterior, mas os filetes de água percorrem distâncias maiores transportando maior quantidade de material, aprofundando e concentrando o escoamento.
- Erosão por escoamento concentrado: sulcos e ravinas formados pouco a pouco sofrem deslizamentos de desabamentos, terminando por formar grandes voçorocas.

O sedimento contido nos cursos d'água é originado da erosão na bacia e da erosão no próprio leito e das margens. Em ocasiões de chuvas intensas, as enxurradas transportam muitas partículas para o rio, onde esse sedimento se move tanto em suspensão, quanto pelo leito com partículas maiores que rolam ou deslizam, ou mesmo em trocas, com partículas que saltam e voltam ao leito (CARVALHO, 2008). Dependendo da velocidade da corrente e do efeito de turbulência, partículas do leito podem entrar no meio líquido e ficar em suspensão e aí permanecer até que voltem a se movimentar no leito quando as forças atuantes se reduzirem (CARVALHO *et al.*, 2000).

De acordo com *Subcommittee on Sedimentation* (1963) há três meios distintos pelos quais as partículas sólidas se movimentam em um fluxo (Figura 1):

- Carga de arrasto: são as partículas de sedimento que rolam ou escorregam longitudinalmente no curso d'água. As partículas se encontram em contato com o leito praticamente o tempo todo.
- Carga saltante: partículas que pulam ao longo do curso d'água por efeito da correnteza ou devido ao impacto de outras partículas.

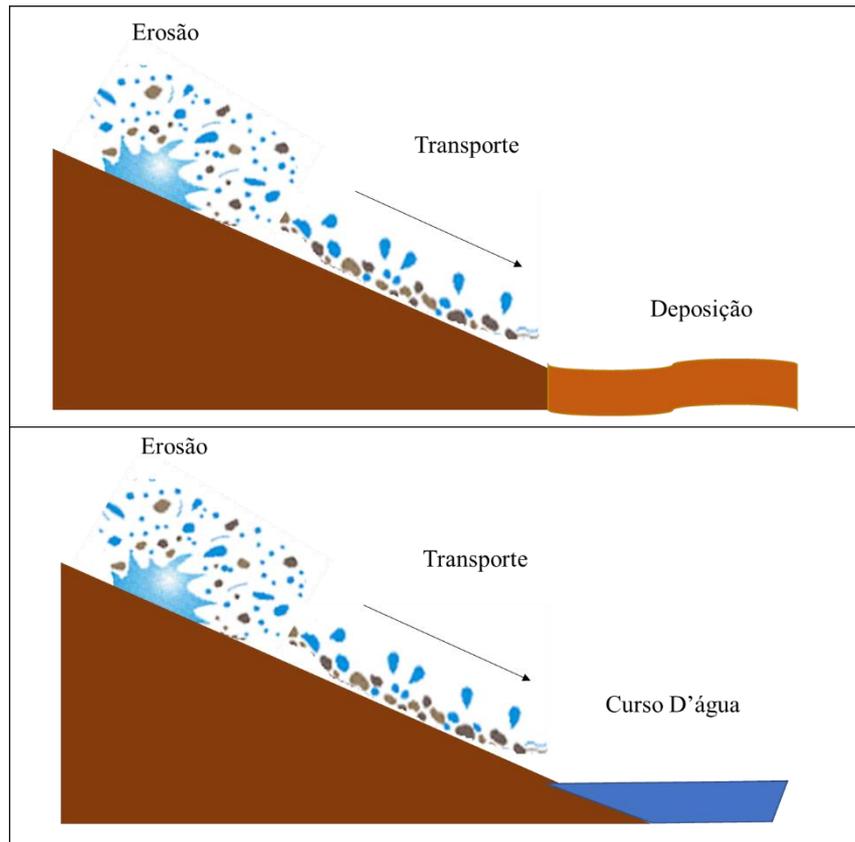
- Carga em suspensão: partículas que são transportadas ao longo da coluna de água através do suporte promovido pela componente vertical da velocidade do fluxo turbulento, enquanto estão sendo transportadas pelas componentes horizontais dessas velocidades, sendo pequenas o bastante para permanecerem em suspensão, subindo e descendo na corrente acima do leito.



*Figura 1 – Trajetória de partículas sólidas ao longo da coluna de água de um rio.*

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).

A Figura 2 apresenta um resumo da dinâmica de sedimentos em uma bacia. O processo inicia-se pela erosão, o sedimento é transportado pela ação dos agentes do intemperismo e acaba por se depositar em uma área a jusante da bacia de menor declividade ou alcança um curso d'água onde é transportado pela energia do escoamento.



*Figura 2 – Ciclo Hidrossedimentológico.*

*(FONTE: Adaptado de DERPSCH et al., 1991).*

Também deve ser considerado a distribuição dos sedimentos ao longo de um curso d'água com relação ao tempo (CARVALHO, 2008). A natureza procura seu próprio equilíbrio, considerado estável para o rio. Se há mudanças na quantidade de descarga sólida, o rio responde conforme as alterações impostas. Se a descarga sólida é grande, haverá uma tendência à deposição, ocorrendo agradação do leito do rio. Ao contrário, se a descarga sólida é pequena, haverá uma tendência de erosão, ocorrendo degradação do leito (CARVALHO, 2008). Como citado por Bruk (1985) este equilíbrio é representado através da balança de Lane (1954) representada na Figura 3, a qual descreve uma proporcionalidade entre a descarga sólida, o diâmetro das partículas, a declividade do leito e a vazão do rio. Quanto maior for a descarga sólida de sedimentos e o tamanho das partículas, maior será a tendência à deposição e agradação do leito. Em contrapartida, quanto maior for a declividade do rio e a sua vazão, maior será a tendência à erosão e degradação do leito. Cada rio possui suas características próprias (declividade, vazão, granulometria dos sedimentos), quando a balança se encontra em equilíbrio a dinâmica dos sedimentos se encontra no ponto da sua capacidade de transporte, que de acordo

com Zhang *et al.* (2009) é definida como a máxima quantidade de sedimento que o fluxo pode conduzir.

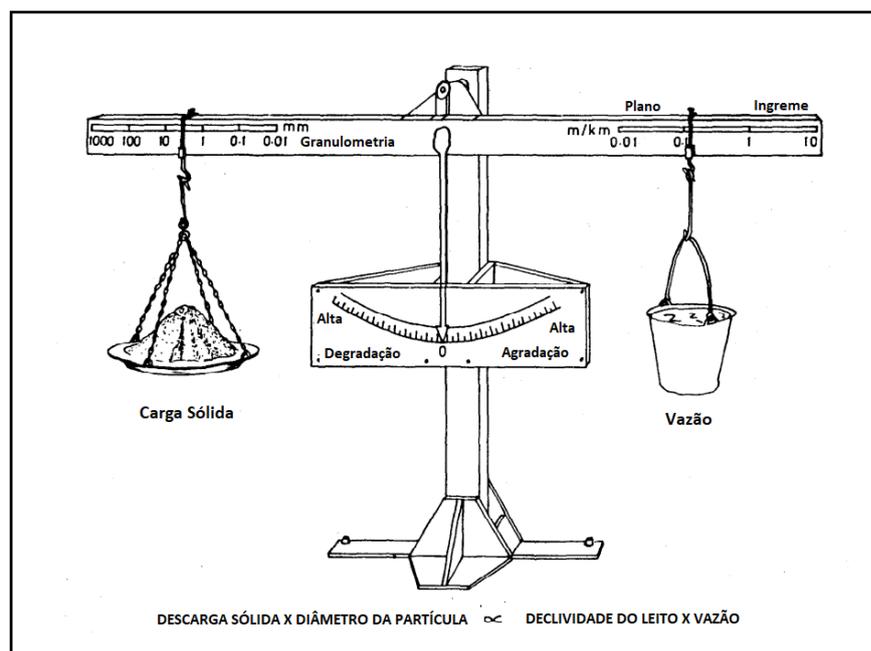


Figura 3 – Relações entre os fatores que contribuem para o estabelecimento de um equilíbrio em um canal de rio.

(FONTE: Adaptado de BRUNK, 1985).

### 2.3 Equações matemáticas utilizadas para a representação dos processos Hidrosedimentológicos

O planejamento científico para a conservação do solo e da água requer grande conhecimento das relações entre os fatores que causam perda de solo e água e aqueles que ajudam a reduzir tais perdas (WISCHMEIER & SMITH, 1978). Zingg (1940) foi um dos primeiros pesquisadores a desenvolver uma equação de predição da erosão, proposta para solucionar problemas e selecionar práticas de conservação para reduzir a erosão excessiva, a equação era uma simples expressão da erosão do solo relacionada com a declividade e o comprimento da encosta. Posteriormente Smith e Whitt (1948) acrescentaram termos que refletiam a influência da cobertura e a gestão da erosão do solo (DEKKER, 1996).

No início dos anos 1950 foi desenvolvido um conjunto de equações regionais que utilizavam termos de erodibilidade dos principais solos de determinadas regiões. As equações se mostraram bastante úteis para estas regiões específicas, porém havia a necessidade de propor uma equação da perda de solo em termos universais (DEKKER, 1996). Em meados dos anos 50 Wischmeier, Smith e seus associados começaram a montar e analisar uma extensa

quantidade de dados disponíveis (DEKKER, 1996). Surgiu então a equação universal de perdas de solo (USLE, WISCHMEIER & SMITH, 1965), desenvolvida com base em dados estudados em mais de 10.000 lotes, com distintas características de clima, solo, relevo e cultivo, sendo a equação mais utilizada para o cálculo da erosão média (CARVALHO, 2008).

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

*Equação 1*

Na qual, A é a perda de solo [t/ha]; R é o fator de erosividade da chuva, expresso pelo poder erosivo da precipitação média anual da região [tm/ha.mm/h]; K é o fator de erodibilidade do solo, expresso pela capacidade do solo de sofrer erosão [t/ha/(tm/ha.mm/h)]; L é o fator topográfico que representa o comprimento do declive [m]; S é o fator topográfico que representa a declividade do terreno [-]; C é o fator que expressa o uso e manejo do solo da cultura [-] e P é o fator que expressa as práticas conservacionistas do solo [-].

Nos trabalhos de Renard *et al.* (1991; 1994; 1997) foi desenvolvida e apresentada uma proposta de alteração da USLE, a RUSLE, Equação Universal da Perda de Solo Revisada, que se propõem a incluir à equação novos conhecimentos adquiridos e uma nova base de dados obtida nas décadas de 80 e 90 (BUARQUE, 2015). As principais modificações foram feitas na forma como os fatores da USLE são determinados, com ênfase em uma abordagem para determinar o fator “C” de cobertura do solo a partir de informações sobre a forma da vegetação, métodos de práticas de cultivo e não de dados plotados a partir de observações experimentais como anteriormente na USLE (MERRITT *et al.*, 2003).

A USLE fornece apenas uma estimativa de perda do solo, não sendo representativa para eventos específicos, não levando em conta como os processos de chuva e vazão, heterogeneidade de fatores de cobertura vegetal e usos do solo, alteram a erosão (MERRITT *et al.*, 2003). Para determinar a produção de sedimentos é necessário aplicar um coeficiente que representa a proporção de perda bruta de solo que é revertida em produção de sedimentos oriunda da perda de solo gerada na bacia (BUARQUE, 2015). Esse coeficiente é conhecido como taxa de transferência de sedimentos (SDR – Sediment Delivery Ratio), o qual sofre influência de fatores físicos da região, como o tamanho da área de drenagem, a declividade do terreno e a geometria do canal (CHOW, 1964). A SDR é descrita pela equação que segue.

$$SDR = \frac{Y}{E \cdot A}$$

*Equação 2*

Na qual SDR é a taxa de transferência de sedimentos [%]; Y é a quantidade de sedimento produzido na bacia [t]; E é a erosão por unidade de área na bacia [t/m<sup>2</sup>] e A é a área da bacia [m<sup>2</sup>].

Williams (1975) propôs uma modificação derivada da equação de USLE, a MUSLE – Equação Universal da Perda de Solo Modificada, que utiliza o próprio volume de escoamento superficial e a vazão de pico de um evento para determinar a perda de solo. Desta forma, a MUSLE não só possibilita um aumento na eficiência da modelagem de sedimentos como também possibilita a simulação de eventos contínuos, necessários para avaliar a evolução temporal dos processos e da dinâmica dos sedimentos (BUARQUE, 2015). A MUSLE é representada pela seguinte equação.

$$E = \alpha \cdot (Q \cdot q_p)^\beta \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

*Equação 3*

Na qual E é o aporte de sedimentos produzido por um evento de chuva [t];  $\alpha$  e  $\beta$  são coeficientes de ajuste referentes às características da bacia [-]; Q é o somatório do volume de escoamento superficial gerado pelo evento de chuva [m<sup>3</sup>];  $q_p$  é a vazão de pico do evento [m<sup>3</sup>/s]; K é o fator de erodibilidade do solo, expresso pela capacidade do solo de sofrer erosão [t/ha/(tm/ha.mm/h)]; LS é o fator topográfico que representa o comprimento do declive e a declividade do terreno [m], C é o fator que expressa o uso e manejo do solo da cultura [-] e P é o fator que expressa as práticas conservacionistas do solo [-].

O transporte de sedimentos nos rios é dividido em duas partes, uma fase líquida correspondendo ao transporte de água e outra sólida, correspondendo ao transporte de sedimentos (carga de leito e carga em suspensão), como descrito anteriormente. Essas fases podem ser descritas de forma acoplada ou não, dependendo da aplicação de interesse (FAGUNDES, 2018). As formulações desacopladas assumem que as modificações do leito ocorrem lentamente ao longo do tempo e que a concentração de sedimento não é elevada (BUARQUE, 2015).

Segundo Buarque (2015), geralmente os modelos hidrodinâmicos unidimensionais resolvem as equações diferenciais de Saint Venant de conservação de massa e de momento. Considerando a existência de contribuições laterais estas equações são descritas como segue.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l$$

Equação 4

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\alpha \cdot Q^2}{A} \right) + g \cdot A_T \left( \frac{\partial h}{\partial x} + S_f \right) = q_l$$

Equação 5

Nas quais  $x$  é a coordenada espacial na direção do escoamento [m];  $A_T$  é a área da seção transversal [m<sup>2</sup>];  $Q$  é a vazão, expressa pela multiplicação da velocidade pela área da seção [m<sup>3</sup>/s];  $\alpha$  é o fator de correção da não uniformidade da velocidade na seção [-];  $t$  é o tempo [s];  $g$  é a aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>];  $h$  é o nível da água [m] e  $S_f$  é a declividade da linha de energia do escoamento [-].

Entretanto, segundo Buarque (2015), as equações de Saint Venant fornecem as variações do escoamento, mas não são suficientes para determinar possíveis alterações que venham a ocorrer no leito de rios de fundo móvel no tempo e no espaço. Desta forma, a fase líquida deve ser solucionada de forma desacoplada considerando condições de fundo fixo e mantendo-se os valores das variáveis da seção constantes. Solucionada a fase líquida, pode-se utilizar uma equação de transporte de sedimentos para determinar o volume de sedimentos erodido ou depositado e as novas configurações da seção para o próximo passo de tempo. (BUARQUE, 2015). Segundo Buarque (2015), utiliza-se a equação da continuidade de sedimentos simplificada de Exner (CHANG, 1998) em abordagens como essa. A equação é descrita conforme segue.

$$(1 - \lambda) \frac{\partial A_t}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} = q_s$$

Equação 6

Na qual  $\lambda$  é a porosidade do material do fundo [-];  $A_t$  é a área da seção transversal [m<sup>2</sup>];  $Q_s$  é a descarga sólida volumétrica [m<sup>3</sup>/s] e  $q_s$  é a contribuição lateral de sedimentos por unidade de largura [t/m.s].

De acordo com Vieira da Silva & Wilson Jr. (2006), a abordagem através da equação de Exner é muito útil para as análises de sedimentos não-coesivos. Porém, para sedimentos mais finos em rios nos quais as concentrações do material em suspensão são elevadas, pode ser importante considerar a difusão longitudinal através da equação de difusão advecção. A

equação é obtida a partir da aplicação do princípio de conservação de massa no transporte de uma grandeza escalar pelo escoamento. Neste caso, a referida grandeza escalar é representada pela concentração de sedimentos (ALAMY FILHO & SCHULZ, 2006). A equação assume a seguinte forma:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u} \cdot \bar{c})}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ (D + D_{sm}) \cdot \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right] + W_s \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_v}$$

*Equação 7*

Na qual,  $\bar{c}$  é a concentração média de sedimentos [massa/volume];  $\bar{u}$  é a velocidade média do escoamento [m/s];  $W_s$  é a velocidade de sedimentação das partículas [m/s];  $x_v$  é a direção vertical do escoamento [m];  $D$  é o coeficiente de difusão molecular do escoamento [m<sup>2</sup>/s] e  $D_{sm}$  é o coeficiente de difusão turbulento do escoamento [m<sup>2</sup>/s].

#### **2.4 Ferramentas de Geoprocessamento para Simulações Hidrossedimentológicas e Tomada de Decisões**

O geoprocessamento pode ser definido como o conjunto de tecnologias de coleta e tratamento de informações espaciais e de desenvolvimento e uso de sistemas que as utilizam (RODRIGUES, 1990). Segundo Mendes (1998), a utilização de técnicas de geoprocessamento constitui-se em instrumento de grande potencial para o estabelecimento de planos integrados de conservação do solo e da água.

Neste contexto, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) se inserem como uma ferramenta que tem a capacidade de manipular as funções que representam os processos ambientais em diversas regiões, de uma forma simples e eficiente, permitindo uma economia de recursos e tempo (MACHADO, 2002). Essas manipulações permitem agregar, sobrepor e manipular dados de diferentes fontes (imagens de satélites, modelos digitais de elevação, mapas de uso e cobertura do solo, dados de precipitação, limites de bacias hidrográficas, linhas de hidrografia etc.) em diferentes escalas de análise. O resultado destas manipulações pode ser apresentado sob a forma de mapas temáticos com as informações desejadas (MACHADO, 2002).

Segundo Xavier da Silva & Carvalho Filho (1993), o uso do geoprocessamento, no que se refere ao problema de erosão dos solos, pode ser entendido como sendo o levantamento das

condições ambientais nas quais são identificadas a extensão e a possível expansão territorial de um processo ambiental.

De acordo com Silva (2007), os SIG's são destinados ao acolhimento e ao tratamento de informações georreferenciadas, permitindo a manipulação de dados de diversas fontes, recuperando e combinando informações e criando diversos tipos de análises inclusive podem ser combinados com modelos hidrológicos e hidrossedimentológicos para a utilização em Sistemas de Apoio à Decisão (SAD's). Os SAD's são sistemas de informação dotados de capacidade de modelagem científicas, ferramentas de manipulação e de análise de dados, configurados para atender processos de tomada de decisão na mitigação de problemas no ambiente. Seus objetivos gerais são melhorar a eficiência ou qualidade dos processos de tomada de decisão em nível de planejamento e gerência (RAFAELI NETO, 2000). A Figura 4 apresenta um esquema elucidando como os Sistemas de Informações Geográficas auxiliam na tomada de decisões.

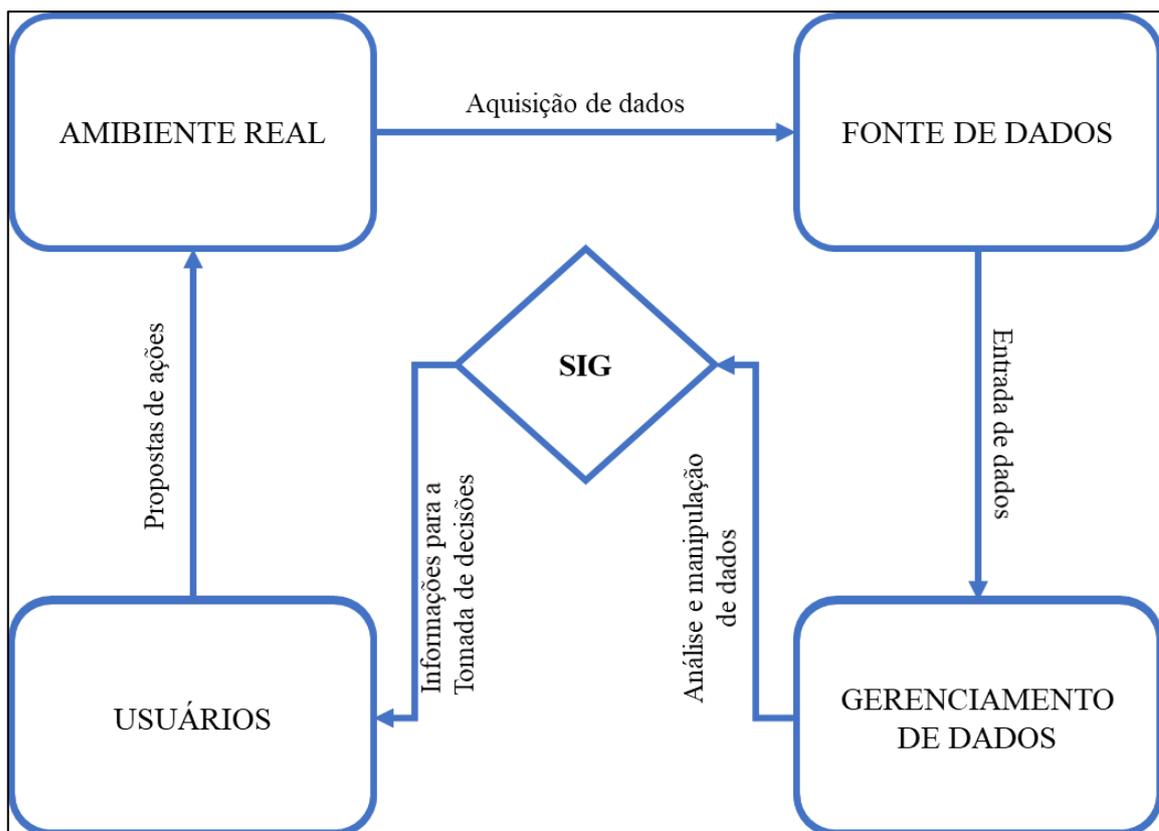


Figura 4 – Ferramenta SIG Como Sistema de Apoio à Tomada de Decisões

(FONTE: Adaptado de ROCHA, 2000).

Em ambiente SIG é possível representar a variabilidade espacial das características de uma bacia dentro de um ambiente de células de grade (“*pixels*”) em diferentes resoluções (MOLNAR & JULIEN, 1998). No que diz respeito aos processos erosivos, a principal vantagem em utilizar SIG’s é que os processos de erosão variam espacialmente e, portanto, a representação da bacia por meio de células de grade é utilizada para que essas variabilidades espaciais possam ser consideradas (DE ROO *et al.*, 1996; BESKOW *et al.*, 2009). Além disso o volume de dados necessários para a adequada representação espacial da bacia hidrográfica pode ser facilmente manipulado em ambiente SIG (BUARQUE, 2015).

### 2.5 Sensoriamento Remoto Aplicado à Hidrossedimentologia

O sensoriamento remoto pode ser definido como a ciência e a arte de aquisição de informações de um alvo utilizando um dispositivo sem contato direto com o alvo analisado. Em muitos aspectos, o sensoriamento remoto pode ser pensado como um processo de leitura que faz uso de diversos sensores que coletam remotamente dados que podem ser averiguados para se obter informações sobre objetos, áreas ou fenômenos que estão sendo analisados. De uma forma geral, o termo sensoriamento remoto se refere ao uso de sensores de radiação eletromagnéticas para registrar imagens que ao serem interpretadas fornecem informações úteis sobre o ambiente (LILLESAND *et al.*, 2007; CURRAN, 1985).

A principal fonte de energia eletromagnética captada por satélites é o sol (HAYAKWA, 2007). Existem muitas formas de energia eletromagnética, compostas por radiações de ondas com diferentes comprimentos e frequência. Quanto maior for o comprimento da onda menor será a frequência observada dela. Em sensoriamento remoto é comum adotar-se categorias de campos magnéticas que correspondem a faixas de comprimento de onda dentro de um espectro magnético. A luz visível, que enxergamos, se encontra dentro desse espectro de campos magnéticos (LILLESAND., 2007). A Figura 5 apresenta o espectro de luz visível inserido em um campo eletromagnético compreendido entre ondas de raios Gama e ondas de Rádio (0,00001 – 1.000.000  $\mu\text{m}$ ).

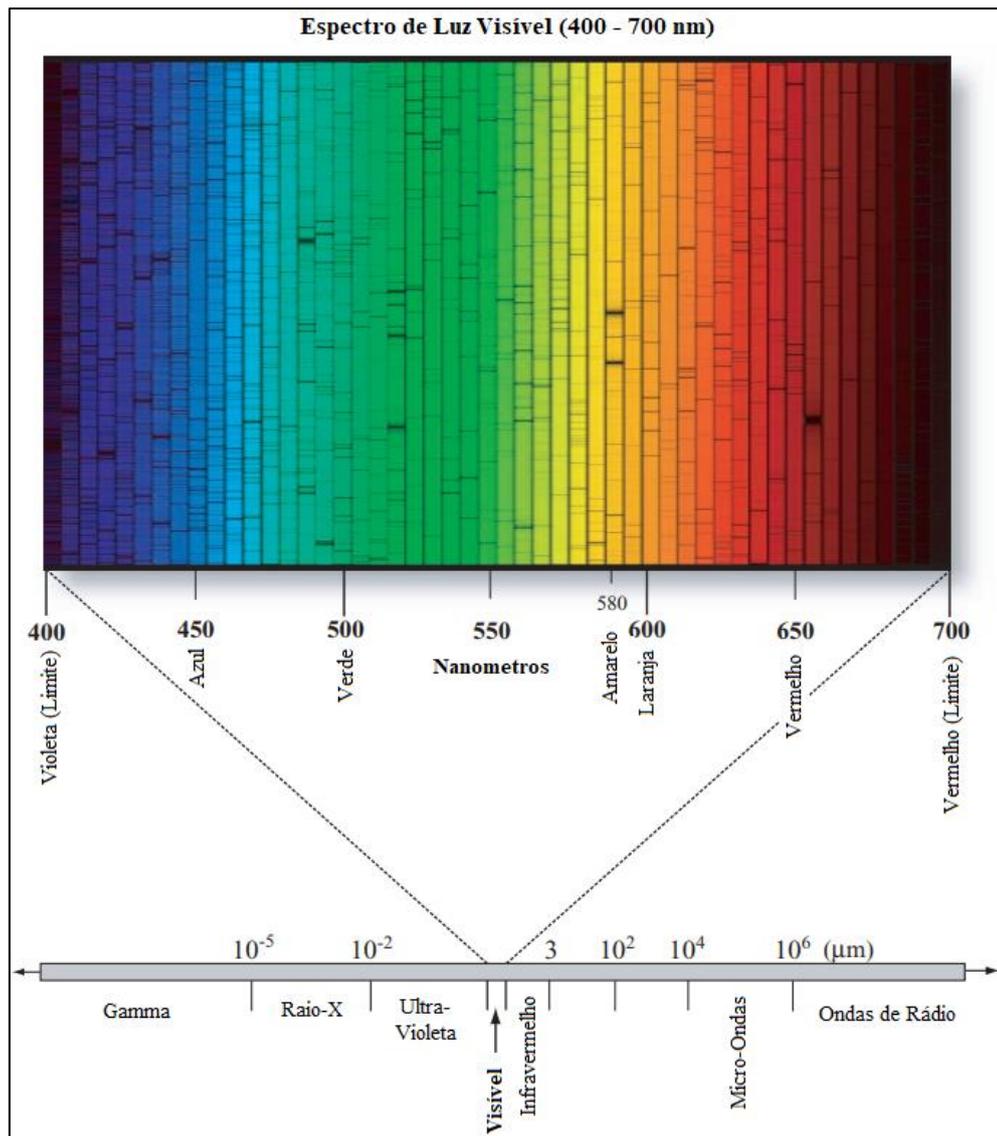


Figura 5 – Espectro de Luz Visível.

(FONTE: Adaptado de JENSEN, 2009).

A reflexão espectral é uma das formas de interação entre a radiação eletromagnética emitida por um corpo e a matéria que é alcançada por ela. A refletância espectral é definida como a razão (adimensional) entre o fluxo radiante (taxa temporal do fluxo de energia) refletido por uma superfície e o fluxo radiante incidente nela (JENSEN, 2009). A interação entre a radiação eletromagnética emitida por um corpo e a matéria que é alcançada por ela é descrita em função de três componentes: reflexão, transmissão e absorção. Logo, a energia incidente em um corpo pode ser refletida, absorvida pelo corpo ou convertida em outras formas de energia que passam a ser transmitidas através dela.

As imagens de satélites são obtidas através de sensores que se encontram acoplados aos satélites que orbitam a terra. As imagens de diferentes satélites são diferenciadas principalmente com base nos tipos de resolução, seus sensores e o modo de disponibilidade. No que diz respeito à resolução, elas são novamente categorizadas em quatro tipos diferentes: resolução espectral, espacial, temporal e radiométrica. A área da superfície coberta por um *pixel* de uma imagem é denominada resolução espacial de uma imagem de satélite. A resolução temporal é denominada como o período entre as aquisições de imagens, isto é, o período que o satélite leva para voltar a orbitar o mesmo local da terra adquirindo dados através de seu sensor (AROMA & KUMUDHA, 2015).

A resolução espectral é relativa à região do espectro eletromagnético observado. O número e o comprimento das faixas determinam a resolução espectral de uma imagem, sendo que estas variam de acordo com o espectro apresentado na Figura 5. A resolução radiométrica é denominada de acordo com a menor diferença de energia observada a partir da reflectância eletromagnética (AROMA & KUMUDHA, 2015).

Segundo Aroma & Kumudha a qualidade das imagens de satélite é influenciada pelo tipo de sensores utilizados, uma vez que podem ser afetados pelas condições climáticas levando a uma má qualidade das imagens, e pelo modo de disponibilidade de imagens de satélite. As versões avançadas de imagens de satélite adquiridas podem ser exploradas com tecnologias de imagens de alta resolução, mas a disponibilidade de recursos de imagens de satélites gratuitos é limitada (AROMA & KUMUDHA, 2015). A Tabela 1 apresenta um breve resumo de alguns dos principais satélites de aquisição de imagens de sensoriamento remoto, identificando os sensores que recebem as informações, a resolução espacial e temporal e o período de dados disponíveis.

*Tabela 1 – Alguns dos Principais Satélites de Aquisição de Dados de Sensoriamento Remoto.*

Satélite	Sensor	Resolução espacial (m)	Resolução Temporal (dias)	Período de Dados
Landsat 1	RVB e MSS	80	16	1972 - 1978
Landsat 2	RVB e MSS	80	16	1975 - 1981
Landsat 3	RVB e MSS	80	16	1978 - 1983
Landsat 4	TM e MSS	80 e 30	16	1982 - 1993
Landsat 5	TM e MSS	80 e 30	16	1984 - 2013
Landsat 6*	ETM	30	16	1993
Landsat 7**	ETM +	30	16	1999 - Até o momento

Satélite	Sensor	Resolução espacial (m)	Resolução Temporal (dias)	Período de Dados
Landsat 8	OLI	30	16	2013 - Até o momento
SPOT 6	MS	6	1 a 5	2012 - Até o momento
SPOT 7	MS	6	1 a 5	2014 - Até o momento
TERRA	MODIS	250, 500 e 1000	1	1999 - Até o momento
AQUA	MODIS	250, 500 e 1000	1	2002 - Até o momento
SENTINEL 2A	MSI	10, 20 e 60	10	2015 - Até o momento
SENTINEL 2B	MSI	10, 20 e 60	10	2017 - Até o momento

\*Ocorreu falha na operação de lançamento do satélite – sem dados disponíveis

\*\*Os dados a partir de 2003 apresentam problemas devido a uma falha em um dos equipamentos.

(FONTES: <http://Landsat.gsfc.nasa.gov>, <https://spot.cnes.fr/en/SPOT/index.htm>, <https://modis.gsfc.nasa.gov/> e <https://sentinel.esa.int/>).

No monitoramento hidrológico é possível obter medições *in situ* de diversos parâmetros (precipitação, níveis, temperatura, vazões, concentrações de sedimento etc.), porém esses dados são coletados em fontes pontuais, fazendo com que seja necessária uma grande quantidade de pontos de coleta para que interpolações apresentem bons resultados de forma distribuída. Infelizmente, muitas vezes não há observações suficientes para criar dados distribuídos estatisticamente significativos. Neste contexto, pesquisas têm sido desenvolvidas para que o sensoriamento remoto possa ser uma ferramenta de desenvolvimento de medições espaciais de variáveis hidrológicas (JENSEN, 2009).

Segundo Jensen (2009), a radiância total refletida pela água e captada por um sensor contido em um satélite é uma função de quatro fontes de energia magnética (Figura 6):

$$L_t = L_p + L_s + L_v + L_b$$

*Equação 8*

Na qual,  $L_t$  é a radiância total refletida pela água [ $W/m^2$ ];  $L_p$  é a radiância que representa um ruído atmosférico registrado [ $W/m^2$ ];  $L_s$  é a radiância da superfície da água [ $W/m^2$ ];  $L_v$  é a radiância da subsuperfície da água [ $W/m^2$ ] e  $L_b$  é a radiância do leito do corpo d'água [ $W/m^2$ ].

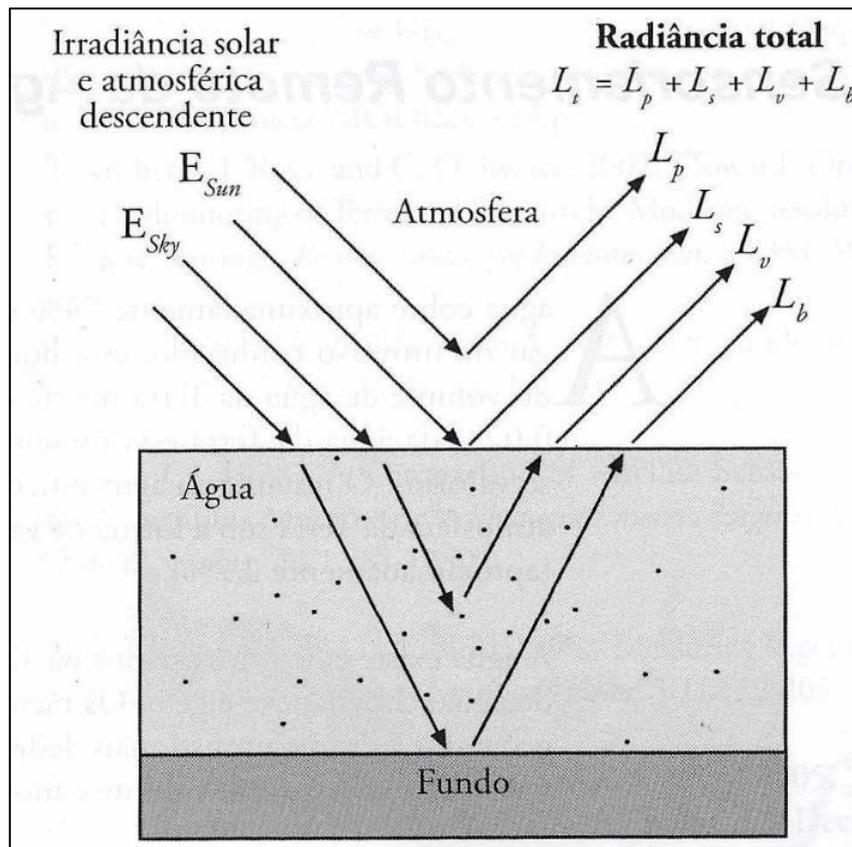


Figura 6 - Radiação Total Refletida pela Água.

(FONTE: JENSEN, 2009).

Sobre a ótica do comportamento das ondas eletromagnéticas no meio aquático cabe distinguir por um lado as propriedades da água “pura” e por outro lado das águas naturais, evidentemente, as águas naturais são uma mistura de água pura com compostos em suspensão ou dissolvidos que alteram significativamente a reflectância espectral da água (BANNISTER, 1988).

Segundo Jensen (2009) os sedimentos em suspensão interferem no comportamento espectral da água. Considerando solos argilosos e siltsos conforme aumenta-se a concentração de sólidos em suspensão da água originados desses solos aumenta-se também a porcentagem da reflectância espectral da água (Figura 7). Esse aumento é representado de forma mais significativa na região compreendida, do espectro de luz visível, da faixa espectral do vermelho (0,64 – 0,67  $\mu\text{m}$ ).

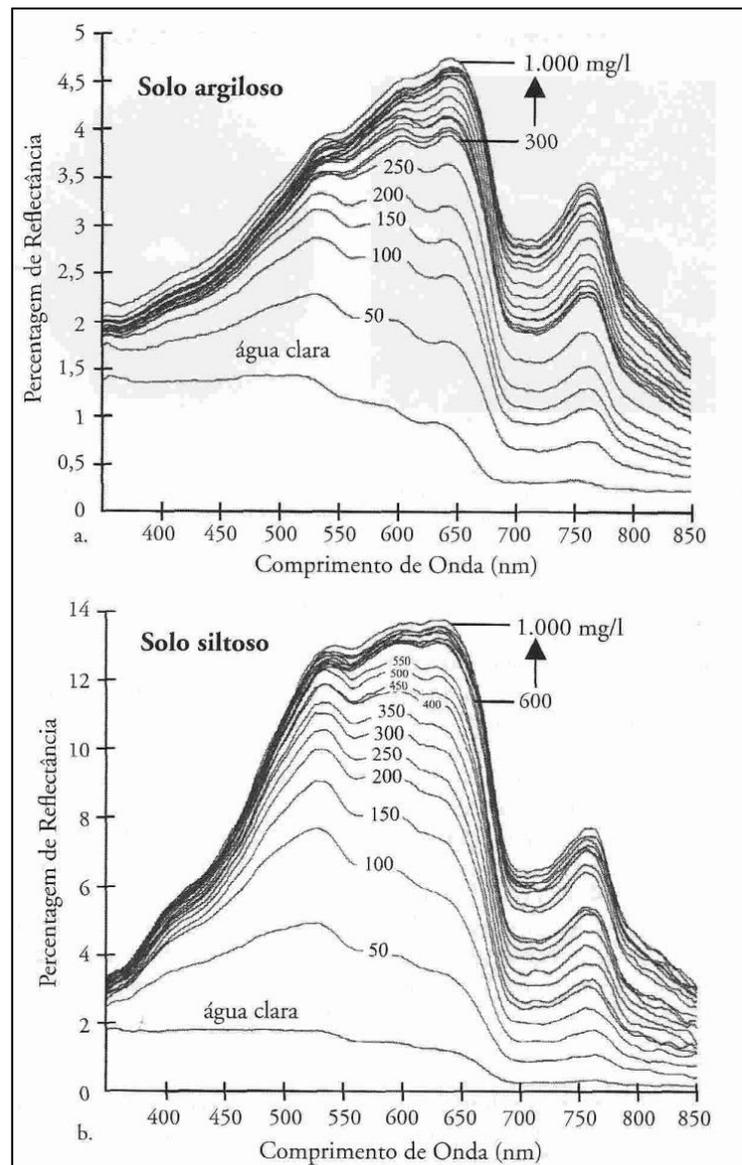


Figura 7 - Variação da Reflectância da Água de Acordo com a Variação da Concentração de Sedimentos em Suspensão para Solos Siltosos e Argilosos.

(FONTE: JENSEN, 2009).

Mertes *et al.* (1993), desenvolveram um método, baseado em análises espectrais mistas, para estimar a concentração de sedimentos suspensos nas águas do rio Amazonas através de imagens obtidas pelos sensores MSS e TM de satélites Landsat. As concentrações de sedimentos foram estimadas através de uma curva de calibração não linear que relacionou concentrações de sedimentos medidos em laboratório com e a porcentagem de reflectância espectral obtida das imagens de satélite.

Ritchie *et al.* (2003), destacam que técnicas de sensoriamento remoto podem ser usadas para monitorar parâmetros de qualidade da água (sedimentos em suspensão, turbidez, clorofila,

temperatura etc.). A integração de dados de sensoriamento remoto como dados medidos em campo, sensores presentes em barcos e aeronaves e GPS's é capaz de fornecer uma ferramenta valiosa para monitorar e avaliar as vias navegáveis. Os dados detectados remotamente podem ser usados para criar um banco de dados geograficamente localizado para fornecer linhas de base para futuras comparações (RITCHIE *et al.*, 2003).

Recentemente, Scottá (2018), avaliou a hidrodinâmica e a sedimentologia do rio Guaíba (Rio Grande do Sul) através de dados obtidos *in situ* da concentração de sedimentos em suspensão (CSS) comparados com imagens de satélite obtidas através do sensor *Operation Land Imager* (OLI) do satélite *Landsat 8*. A correlação entre os dados medidos e as imagens de sensoriamento remoto foi extraída através de modelos de regressão para os quais foram aplicados testes de normalidade dos resíduos para validar a correlação extraída.

Fagundes (2018), avaliou o modelo de sedimentos MGB-SED para a região da bacia do rio Doce, localizada entre os Estados de Minas Gerais e Espírito Santo, a partir do apoio de dados medidos e dados da reflectância espectral da superfície da banda do vermelho de imagens de satélite. Os resultados indicaram que a reflectância da superfície apresentou fortes valores de correlação com os dados da Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS), maiores do que a própria correlação entre os dados simulados e os dados observados de CSS, sendo assim esta métrica de obtenção de dados se mostra promissora para melhoria em simulações hidrossedimentológicas de grande escala.

Portanto, o sensoriamento remoto tem potencial para monitoramento da dinâmica e da distribuição espacial da concentração de sedimentos suspensos, fazendo-se necessário entender a relação da reflectância espectral da água em rios e a sua interação com fenômenos e características de uma bacia hidrográfica para sua utilização no auxílio à calibração e validação de modelos hidrossedimentológicos.

## 2.6 Modelos de Geração e do Transporte de Sedimentos

Existem inúmeros tipos de modelos matemáticos hidrossedimentológicos, cada qual com a sua complexidade e particularidades. Os modelos são desenvolvidos com a finalidade de descrever processos e/ou comportamentos que sejam representativos, gerando resultados satisfatórios dos fenômenos que os desenvolvedores e usuários buscam analisar (FAGUNDES,

2018). A Tabela 2 abaixo traz um breve resumo de classificação de modelos matemáticos de acordo com Tucci (1998).

*Tabela 2 – Classificação e Estrutura Geral dos Modelos Hidrossedimentológicos.*

<b>Estrutura</b>	<b>Conceituais:</b> levam em consideração os processos físicos que ocorrem na bacia <b>Empíricos:</b> levam em consideração análise estatística de experimentos
<b>Variabilidade Espacial</b>	<b>Concentrados:</b> parâmetros e variáveis não possuem variabilidade espacial <b>Distribuídos:</b> parâmetros e variáveis possuem dependência espacial
<b>Intervalos de Tempo</b>	<b>Contínuos:</b> fenômenos a serem descritos são contínuos no tempo <b>Discretos:</b> fenômenos a serem descritos em intervalos discretos de tempo

(FONTE: Adaptado de TUCCI, 1998).

Existem ainda os modelos de base física que, como o próprio nome sugere, são aqueles em que os parâmetros apresentam significados puramente físicos, sendo geralmente necessários muitos desses para representar de forma realista o que ocorre na natureza. Os modelos utilizados na simulação de transporte de sedimentos se diferenciam principalmente por causa da complexidade, dos processos considerados e dos dados necessários para calibração e uso de cada modelo. Os pesquisadores consideram que não existe modelo ideal, capaz de representar todas as situações, e que o modelo a ser utilizado vai depender dos objetivos a serem alcançados e das características da bacia (MERRIT *et al.*, 2003).

Tradicionalmente, a avaliação dos impactos provocados pelos sedimentos através de modelos matemáticos são baseadas em duas abordagens: uma com o interesse voltado para a perda de solo, buscando estimar a produção de sedimentos em pequenas áreas e avaliar diferentes práticas de uso e conservação do solo, e outra com interesse voltado para o transporte de sedimentos na rede de drenagem, envolvendo os processos de deposição e alteração da morfologia fluvial (BUARQUE, 2015). Segundo Buarque (2015), é possível que modelos adotem em sua estrutura módulos enquadrados em diferentes categorias. Por exemplo, enquanto modelos podem ser completamente empíricos, utilizando formulações empíricas para a geração de sedimentos e posterior determinação do aporte da bacia, outros podem adotar fórmulas empíricas para a geração e equações conceituais ou físicas para o transporte das cargas nos trechos de rios, ou vice-versa. Em modelos que utilizam um componente hidrológico chuvas, a abordagem pode ainda ser físico-conceitual neste componente, mas empírica no módulo de sedimentos. Ainda, os modelos podem ser de base física, conceitual ou empírica, mas em termos temporais serem baseados em eventos contínuos ou adotar as duas abordagens. Em qualquer caso, os modelos podem ser do tipo distribuídos ou concentrados.

Em Merrit *et al.* (2003), há uma revisão de diversos modelos integrados para a geração e transporte de sedimentos. O estudo foi realizado com o objetivo de fornecer ao usuário um recurso de potenciais modelos de escolha para simulações em diferentes escalas de captação e aplicação.

O modelo AGNPS (YOUNG *et al.*, 1989), é um modelo desenvolvido para prever e analisar a qualidade da água em bacias rurais que não superem 20.000 ha. Os cálculos ocorrem em três etapas. Cálculos iniciais incluindo estimativas da erosão do solo, volume de escoamento superficial e dispersão de poluentes. Na segunda etapa o volume do escoamento gerado contém a quantidade de sedimentos gerada nas células da etapa anterior. Os cálculos dos sedimentos e dos nutrientes é propagado para as células das etapas posteriores (MERRIT *et al.*, 2003).

O modelo ANSWERS (BEASLEY *et al.*, 1980) difere do modelo citado anteriormente pois apresenta uma representação da erosão do solo a partir de bases físicas. Suas componentes apresentam foco nos componentes do sedimento e da erosão enquanto o AGNPS possui enfoque nas componentes de nutrientes da água (MERRIT *et al.*, 2003).

O modelo CREAMS (KNISEL, 1980), foi desenvolvido como uma ferramenta para avaliar os efeitos relativos às práticas agrícolas na geração de poluentes no escoamento superficial e na zona radicular do solo. O modelo apresenta três componentes: modelagem hidrológica, modelagens de erosão/sedimentação e transporte de poluentes (MERRIT *et al.*, 2003).

O modelo GUEST (MISRA & ROSE, 1996) é um modelo desenvolvido para interpretar flutuações temporais na concentração de sedimentos originada a partir de eventos específicos. Os algoritmos do modelo descrevem a erosão do solo, o transporte e a deposição de sedimentos a partir de equações de bases físicas (MERRIT *et al.*, 2003).

O modelo IQQM (DLWC, 1995; SIMONS *et al.*, 1996) é um modelo conceitual projetado para uso como ferramenta no planejamento e avaliação da gestão de recursos hídricos em escalas de bacias hidrográficas. O modelo possui módulos de qualidade da água, transformações de chuva em vazão e água subterrânea (MERRIT *et al.*, 2003).

O modelo LASCAM (VINEY & SIVAPALAN, 1999) é um modelo distribuído e contínuo, desenvolvido inicialmente para modelagem de qualidade da água e atualmente conta com algoritmos de geração e transporte de sedimentos, modelagem de processos hidrológicos, mobilização e transporte de sedimentos. (MERRIT *et al.*, 2003).

O Modelo SedNet (PROSSER *et al.*, 2001) foi desenvolvido para estimar a geração de sedimentos em encostas, nas margens dos rios e na calha dos rios. Os rios são divididos em trechos que se conectam em sub-bacias e fornecem dados de geração e transporte de sedimento a partir de bases conceituas e empíricas que geram resultados através da USLE combinada com a SDR (MERRIT *et al.*, 2003).

O Modelo WEPP (LAFLEN *et al.*, 1991) é um modelo de bases físicas desenvolvido nos Estados Unidos com a intenção de determinar os mecanismos essenciais que controlam a erosão fluvial incluindo impactos de origem antrópica (MERRIT *et al.*, 2003).

O Modelo SWAT (ARNOLD *et al.*, 1998) é um modelo contínuo que representa os processos hidrossedimentológicos por bases físicas. A modelagem envolve a divisão da bacia hidrográfica em Unidades de Resposta Hidrológicas (URH's) e é baseada em parâmetros como as classes de declividade do terreno, tipos e usos do solo. A equação MUSLE é usada para calcular a erosão do solo em cada URH (DE VENTE *et al.*, 2013).

Segundo Buarque (2015), O modelo distribuído e contínuo SWIM (KRYSAKOVA *et al.*, 1998; 2000) foi desenvolvido para fornecer uma ferramenta baseada em SIG para a modelagem hidrológica e de qualidade da água em bacias de centenas a milhares de quilômetros quadrados, cuja parametrização pode ser efetuada utilizando informações disponíveis em escala regional. O Modelo integra hidrologia, vegetação, erosão e dinâmica de nutrientes em grandes bacias discretizadas em três níveis: bacia, sub-bacias e URH's (BUARQUE, 2015).

## 2.7 O Modelo de Grandes Bacias (MGB)

Para a realização do presente estudo, foi utilizado o modelo de sedimentos MGB-SED, desenvolvido por Buarque (2015). Esse modelo consiste na introdução de um módulo de sedimentos ao modelo hidrológico de grandes bacias MGB-IPH desenvolvido por Collischonn (2001). O modelo MGB é um modelo hidrológico baseado em processos, o que significa que são utilizadas equações físicas e conceituais para simular o ciclo hidrológico continental (COLLISCHONN *et al.*, 2007; PONTES *et al.*, 2015).

### 2.7.1 Pré-Processamento de Dados - IPH-Hydro Tools

A obtenção de dados topológicos como redes de drenagem e limites de bacias hidrográficas faz parte das análises mais fundamentais em estudos hidrológicos (JARDIM *et al.*, 2015). Atualmente muitas dessas informações são obtidas com o processamento de modelos digitais de elevação (MDE's) em softwares comerciais de ferramentas SIG. Por outro lado, pacotes de SIG para uso livre, gratuitos e de código aberto, têm aumentado significativamente nos últimos anos, e as vantagens desses pacotes incluem ampla distribuição e customização, desenvolvimento continuado pela comunidade de usuários e atendimento a necessidades específicas (SIQUEIRA *et al.*, 2015).

O *IPH-Hydro Tools* (SIQUEIRA *et al.*, 2015) consiste em um pacote de ferramentas de análise topológica que funciona como um plugin de softwares livres de SIG como o MapWindow GIS (AMES *et al.*, 2008) e o Quantum GIS (SHERMAN *et al.*, 2011). Os procedimentos disponíveis no *IPH-Hydro Tools* referem-se à geração de informações para etapas básicas de modelos hidrológicos incluindo a delimitação de bacias hidrográficas e a geração da rede de drenagem a partir de MDE's (SIQUEIRA *et al.*, 2015).

A Tabela 3 apresenta um breve resumo das ferramentas do *IPH-Hydro Tools*.

*Tabela 3 – Descrição das Principais Ferramentas do IPH-Hydro Tools.*

<b>Ferramenta</b>	<b>Descrição</b>
<i>Sink and Destroy</i>	Permite a Remoção de Depressões no Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado.
<i>Flow Accumulation</i>	Fornecer um arquivo com fluxos acumulados que drenam para cada célula do MDE (a partir do ponto mais a jusante).
<i>Stream Definition</i>	Fornecer a rede de drenagem da bacia a partir do arquivo de fluxos acumulados gerados.
<i>Stream Segmentation</i>	Divide a rede de drenagem gerada em segmentos que se subdividem em confluências.
<i>Watershed Delineation</i>	Define a delimitação da bacia hidrográfica até um ou mais pontos de exutórios.
<i>Catchment Delineation</i>	Define a área de captação que drena para cada trecho de rio segmentado (mini-bacias).
<i>Hydrologic Response Units</i>	Permite a geração de um arquivo matricial ( <i>raster</i> ) contendo as Unidades de Resposta Hidrológicas (URH's) a partir de dados de tipo e usos do solo.

(FONTE: Adaptado de SIQUEIRA *et al.*, 2015).

Uma das grandes qualidades do *IPH-Hydro Tools* é que, além de fornecer todas as informações citadas, é a capacidade de utilização dos dados produzidos na aplicação do modelo hidrológico MGB-IPH (JARDIM *et al.*, 2015).

### 2.7.2 Modelo Hidrológico MGB-IPH

O modelo Hidrológico MGB-IPH (COLLISCHONN, 2001), é um modelo que calcula as vazões dos rios em uma bacia a partir de dados de precipitação e de outras variáveis climáticas. O modelo foi desenvolvido especialmente para bacias de grande porte, onde geral assumem-se limiares de área na ordem de 10.000 km<sup>2</sup> como referência, embora alguns estudos de caso já tenham demonstrado bom desempenho do modelo em bacias menores (FAN *et al.*, 2013) na ordem de 5.000 km<sup>2</sup>. O modelo tem foco nas grandes bacias hidrográficas da América Latina, por causa da baixa e limitada distribuição espacial dos dados hidrológicos, e utiliza como parâmetros o uso e os tipos de solo, a topografia e a vegetação (COLLISCHONN & TUCCI, 2001; FAN, 2015; COLLISCHONN *et al.* 2007). O modelo, desde então, vem sendo aprimorado e validado em diversos estudos de caso, como podem ser citados os trabalhos de: Collischonn *et al.* (2007), Paiva (2009), Fan & Collischonn (2014), Fan (2015), Pontes *et al.* (2015) e Fleischmann *et al.* (2017).

O modelo MGB-IPH é um modelo semi-distribuído, em que a bacia hidrográfica é subdividida em unidades menores utilizando ferramentas de geoprocessamento em uma etapa de pré-processamento de dados. A estrutura do modelo foi baseada na estrutura dos modelos LARSIM (BREMICKER, 1998) e VIC-2L (WOOD *et al.*, 1992; LIANG *et al.*, 1994; ABDULLA & LETTENMAIER, 1997; LOHMANN *et al.*, 1998), com algumas adaptações. O Modelo é baseado em processos e simula o ciclo hidrológico através de relações física e conceituais, sendo simuladas todas as etapas do ciclo hidrológico terrestre, incluindo balanço de água no solo, evapotranspiração, interceptação, escoamento superficial, subsuperficial, subterrâneo e na rede de drenagem, em intervalos de tempo diários ou menores (FAN, 2015; COLLISCHONN, 2001; PAIVA, 2009). O modelo é composto por quatro módulos: módulo simplificado de balanço de água no solo; módulo de evapotranspiração desenvolvido de acordo com os textos de Shuttleworth (1993) e Wigmosta *et al.* (1994); módulo de escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo; módulo de escoamento na rede de drenagem desenvolvido a partir da metodologia de Muskingun-Cunge na forma descrita por Tucci (1998) (COLLISCHONN, 2001).

A primeira versão do modelo desenvolvida por Collischonn (2001) adotava subdivisões regulares em forma quadráticas da bacia hidrográfica, atualmente o modelo foi aprimorado no aspecto de discretização de bacias a partir da adoção de uma métrica de divisão da área em pequenas bacias hidrográficas (denominadas mini-bacias). As mini-bacias não possuem forma definida e são delimitadas a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), além disso as mini-bacias são subdivididas em Unidades de Respostas Hidrológicas (URH's), que são áreas de comportamento hidrológico similar devido às suas características físicas relacionadas ao solo e à cobertura vegetal (FAN & COLLISCHONN, 2014). Os processos hidrológicos são simulados em níveis de URH's, os volumes gerados de escoamento são somados e propagados em nível de mini-bacias, sendo posteriormente propagados na rede de drenagem (PAIVA, 2009).

Segundo Buarque (2015), a propagação de vazões pelo método de Muskingum-Cunge é uma metodologia que se torna muito simplificada quando se pretende simular todas as características da hidráulica fluvial de grandes rios. Paiva (2009) introduziu um modelo hidrodinâmico unidimensional ao MGB-IPH para as propagações de vazões já baseado na discretização da bacia em mini-bacias, o qual também pode ser aplicado como uma forma de propagação mista. Na propagação mista o modelo hidrodinâmico é adotado apenas nos trechos de rio em redes de drenagem de baixas declividades, extensas planícies de inundação e efeitos de remanso significativos. Nos demais trechos o método original é empregado (BUARQUE, 2015).

Além de informações espaciais, para a aplicação do MGB-IPH, dados como informações fluviométricas e pluviométricas da bacia hidrográfica de estudo devem ser obtidos externamente, processados e então utilizados como entrada no modelo, e outras informações de parâmetros hidrológicos devem simplesmente ser preparadas pelo usuário do modelo (FAN & COLLISCHONN, 2014). A Tabela 4 descreve, de forma breve, os dados de entrada no modelo MGB-IPH.

*Tabela 4 – Dados Hidrológicos de Entrada do Modelo MGB-IPH.*

<b>Dados de Entrada</b>	<b>Descrição</b>
<b>Dados de Chuva</b>	Precipitação diária em pontos da bacia hidrográfica em milímetros de chuva.
<b>Dados de Vazão</b>	Informações diárias de vazão provindas de estações fluviométricas na bacia hidrográfica.
<b>Dados de Clima</b>	Médias climáticas mensais dos parâmetros Temperatura, Vento, Umidade Relativa, Insolação e Pressão da região de estudo.

*(FONTE: Adaptado de FAN & COLLISCHONN, 2014).*

### 2.7.3 Modelo de Sedimentos MGB-SED

O modelo MGB-SED, desenvolvido por Buarque (2015), é um modelo de geração e transporte de sedimento, acoplado ao modelo hidrológico MGB-IPH (COLLISCHONN, 2001), que apresenta a metodologia de um modelo matemático para 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>).

O modelo MGB-SED divide os sedimentos gerados na bacia em frações de silte, argila e areia e realiza a propagação dessas ao longo do rio considerando os efeitos de erosão e deposição no canal por meio da abordagem da capacidade de transporte do escoamento, e permite ainda uma troca lateral de sedimentos entre rios e suas planícies de inundação. O modelo ainda permite estimar a quantidade de sedimentos que tem sido erodido e depositado para cada trecho de rio e identifica quais regiões da bacia mais contribuem com a carga de sedimentos (FAGUNDES *et al.*, 2017b).

O modelo é dividido em três módulos distintos que serão apresentados de forma resumida nos subitens seguintes. Maiores detalhes sobre o modelo podem ser encontrados em Buarque (2015), Buarque *et al.* (2016), Fagundes (2018), Fagundes *et al.* (2017a; 2017b).

#### 2.7.3.1 Módulo Bacia

A erosão do solo na bacia é estimada para cada Unidade de Resposta Hidrológica (URH) da mini-bacia utilizando a Equação Universal da Perda de Solo Modificado (MUSLE – WILLIAMS, 2975). Para a sua aplicação em grandes bacias, são utilizadas informações obtidas diretamente do Modelo Digital de Elevação (MDE). Considerando o MDE como uma informação matricial  $k < l, c >$  de  $l$  linhas e  $c$  colunas que armazena informação em cada  $l \times c$  posição (*pixel*) (BUARQUE, 2015).

$$SED_{i,j}^k = \alpha \cdot (Dsup_{i,j}^k \cdot qpico_{i,j}^k Apm_{i,j}^k)^\beta \cdot K_j \cdot C_j \cdot P_j \cdot LS_{i,j}^k \cdot FG_j$$

*Equação 9*

Na qual, SED é a carga de sedimentos resultante da erosão do solo [t]; *Dsup* é o volume de escoamento superficial [mm/ha]; *qpico* é a taxa de pico do escoamento superficial [m<sup>3</sup>/s]; *Apm* é a área de cada *pixel* [ha]; *K* é o fator de erodibilidade do solo [0,013.t.m<sup>2</sup>.h/(m<sup>3</sup>.t.cm)]; *C* é

o fator de cobertura e uso do solo [adimensional];  $P$  é o fator de práticas conservacionistas [adimensional];  $LS$  é o fator topográfico [adimensional];  $FG$  é o fator que considera a existência de fragmentos grosseiros ou rochas;  $i$  e  $j$  são índices que indicam a minibacia e a URH, respectivamente [adimensional] e  $k$  é o *pixel* respectivo à equação [adimensional];  $\alpha$  e  $\beta$  são coeficientes de ajuste [adimensional], adotados no modelo como valores fixos de 11.8 e 0.56, respectivamente.

O volume de escoamento superficial inserido na equação é obtido através do módulo hidrológico do modelo MGB-IPH. A taxa de pico do escoamento superficial é obtida considerando um volume de escoamento uniforme ao longo do dia em cada *pixel*  $k$  de cada subbacia indicada pelos índices  $i$  e  $j$  (BUARQUE, 2015).

$$qpico_{i,j}^k = \frac{Dsup_{i,j}^k A_{i,j}^k}{86.4}$$

*Equação 10*

Na qual,  $qpico$  é a taxa de pico do escoamento superficial [ $m^3/s$ ];  $Dsup$  é o volume de escoamento superficial [mm/ha] e  $A$  é a área de cada *pixel* [ha].

De acordo com Buarque (2015) o fator  $K$  da Equação 9, é calculado a partir de informações sobre as porcentagens de silte (partículas com diâmetro entre 0,002 a 0,05mm), argila (partículas com diâmetro inferior a 0,002mm), areia (partículas com diâmetros de 0,05 a 2mm) e matéria orgânica de cada tipo de solo da bacia.

$$K_j = Fag_j Fcs_j Forg_j Fa_j$$

*Equação 11*

Na qual,  $K$  é o fator de erodibilidade do solo [adimensional];  $Fag$  é o fator de areia grossa [adimensional];  $Fcs$  é o fator de argila-silte [adimensional];  $Forg$  é o fator de carbono orgânico [adimensional];  $Fa$  é o fator de areia [adimensional]; e  $j$  é o índice que indica a URH [adimensional].

Segundo Buarque (2015), esses fatores são calculados através das equações propostas por Williams (1995).

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

*Equação 12*

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

Equação 13

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

Equação 14

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

Equação 15

Nas quais, *SAN*, *SIL*, *ARG* e *orgC* são as porcentagens de areia, silte, argila e carbono orgânico respectivamente, presentes na camada superior do solo da URH *j* [%].

O fator *C* de cobertura e uso do solo é o fator da Equação Universal da Perda de Solo (USLE – WISCHMEIER & SMITCHE, 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. É um fator que varia de 0 a 1, sendo os valores próximos a 0 representativos de vegetações de florestas densas com grande capacidade de proteção do solo e valores próximos a 1 representativos de solos descobertos, sem vegetação e sem proteção. Segundo Buarque (2015), em grandes regiões um detalhamento do uso do solo e cobertura vegetal da região é difícil se obter. Nesta escala, geralmente utilizam-se mapas obtidos após classificação de imagens de satélite e mapas disponibilizados por órgãos do governo ou outras fontes (ex: IBGE, RADAMBRASIL, IBAMA, ANA, FEPAM-RS e MAPBIOMAS).

O fator *P* de práticas conservacionistas representa a diferença entre a perda de solo de um local no qual há o manejo do solo quanto às práticas que visem proteger o solo e uma área sem práticas como o cultivo moro abaixo (“*Down Slope Cultivation*”) (PANDEY *et al.*, 2007). Assim como o fator *C*, os valores variam de 0 a 1, sendo 1 um solo considerado sem práticas conservacionistas e valores abaixo de 1 representativos de diferentes práticas de conservação do solo. Segundo Buarque (2015), na escala de grandes bacias pode ser difícil obter informações de medidas de conservação ou não ser possível identificar as práticas conservacionistas em mapas de solos disponíveis.

O fator  $LS$  é usado na equação para considerar o efeito da topografia na erosão. O fator topográfico depende da declividade do terreno ( $S$ ) e do comprimento da rampa de inclinação ( $L$ ) (RENARD *et al.*, 1997; BESKOW *et al.*, 2009). Segundo Minella *et al.* (2009) em termos práticos a determinação do fator  $LS$  não é simples, devido à dificuldade de identificar o início da formação do escoamento e depois locais de deposição fazendo com que os cálculos apresentem limitações em áreas de relevo complexo ou de grandes extensões, podendo levar a estimativas erradas das taxas de erosão do solo.

Segundo Buarque (2015), para o módulo de sedimentos foi implementada uma rotina computacional para determinar o fator  $LS$  automaticamente, para cada um dos *pixels*  $k < l, c >$  do MDE, na qual as informações básicas utilizadas na rotina são derivadas da etapa de discretização da bacia hidrográfica: MDE; Plano de Direções do Escoamento; Plano das mini-bacias; Plano de URH's. Esses planos são úteis para localizar cada *pixel* nas respectivas mini-bacias e identificar a URH de cada um (BUARQUE, 2015).

O fator de fragmentos grosseiros ( $FG$ ) considera a possibilidade de existência de rochas na camada superior do solo, as quais sejam significativas para afetar a perda de solo (BUARQUE, 2015).

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

*Equação 16*

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

Sobre o aporte de sedimentos das mini-bacias para a rede de drenagem, em cada passo de tempo a carga total de sedimentos gerada em cada URH de uma mini-bacia corresponde ao somatório das cargas estimadas em cada *pixel* que compõe a URH. Porém, em grandes bacias nem todo o volume de sedimentos que chega à rede de drenagem o faz no mesmo passo de tempo devido ao fato de sofrer retardo junto ao escoamento superficial. Para considerar este retardo efetua-se a passagem dos sedimentos por um reservatório linear (Figura 8) (BUARQUE, 2015).

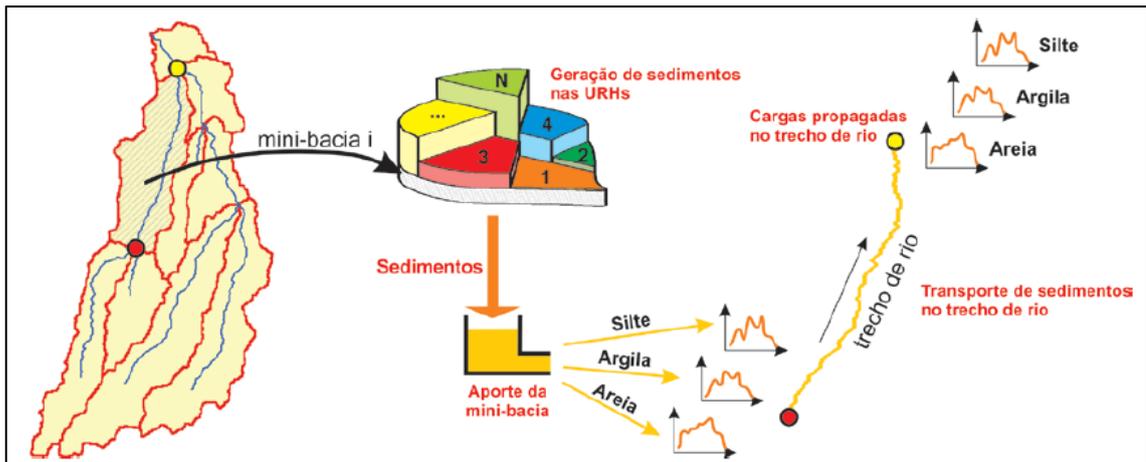


Figura 8 – Esquema dos processos de geração e propagação de sedimentos das mini-bacias e propagação de sedimentos na rede de drenagem.

(FONTE: BUARQUE, 2015).

O volume total de sedimentos gerados em cada URH de uma minibacia e armazenado no reservatório é computado pela Equação 17 e a descarga sólida total de saída do reservatório linear é computada como uma função linear, Equação 22, da respectiva carga armazenada e do tempo de retardo do reservatório superficial (BUARQUE, 2015).

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

Equação 17

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

Equação 18

Nas quais,  $VSED$  é o volume no reservatório de sedimentos da URH [t];  $SED$  é a carga de sedimentos resultante da erosão do solo [t];  $NP$  é o número de *pixels* da URH [adimensional];  $i$  e  $j$  são índices que indicam a mini-bacia e a URH, respectivamente [adimensional] e  $k$  é o *pixel* respectivo à equação [adimensional];  $t$  e  $t - 1$  indicam os passos de tempo atual e anterior, respectivamente [s];  $QS$  é a descarga sólida total de saída do reservatório linear [t/s] e  $TKS$  é o tempo de retardo do reservatório superficial [s].

Por fim, o total de sedimentos aportado de cada mini-bacia é dividido em três classes: areia, silte e argila. Cada classe é definida de acordo com a sua porcentagem na camada superior

de cada tipo de solo da URH, dada pelos parâmetros *SAN*, *SIL* e *ARG*, respectivamente. Os diâmetros característicos de cada classe devem ser fornecidos ao modelo (BUARQUE, 2015).

### 2.7.3.2 Módulo Rio

A propagação da carga de sedimentos ao longo da rede de drenagem é realizada por trecho de rio das mini-bacias, exceto nas mini-bacias de cabeceira (aquelas que não possuem cargas vindo de montante). Cada trecho é caracterizado por uma seção de montante e outra de jusante, quando a mini-bacia é interna, ou apenas uma seção de jusante quando a mini-bacia é de cabeceira. O MGB-SED assume que o transporte de sedimentos ao longo do rio pode ser separado em: material transportado em suspensão (cargas finas - silte e argila) e material transportado pela carga do leito (areia) (BUARQUE, 2015).

Segundo Buarque (2015), o processo de transporte em suspensão das cargas finas na rede de drenagem é representado por um modelo de escoamento não-permanente que considerada a velocidade do escoamento como processos advectivos dominantes.

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

*Equação 19*

Na qual, *A* é a área molhada da seção [m<sup>2</sup>]; *C* é a concentração média de sedimentos [t/m<sup>3</sup>]; *U* é a velocidade média do escoamento na seção [m/s]; *x* é a distância na direção do escoamento [m]; *t* é o tempo [s]; *q<sub>sm</sub>* é a contribuição lateral de sedimentos em cada minibacia [t/m.s] e *q<sub>sfl</sub>* é a descarga de troca de sedimentos entre o rio e a planície de inundação por unidade de comprimento [t/m.s].

Em todas as seções e em todos os intervalos de tempo é conhecida a vazão líquida e é possível inferir através da equação de Manning a área das seções e a profundidade média do escoamento. A concentração é conhecida no intervalo de tempo anterior de casa passo de cálculo sendo assim o único termo desconhecido é a concentração na seção no próprio intervalo de tempo de cálculo, a qual resolve-se a partir da equação:

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

*Equação 20*

Na qual,  $C$  é a concentração média de sedimentos do rio a jusante no final do intervalo de tempo [t/m<sup>3</sup>];  $Q$  é a vazão líquida [m<sup>3</sup>/s];  $\theta$  é o ponderador dos termos temporais [0-1];  $Vol$  é o volume médio da água no trecho [m<sup>3</sup>];  $t$  e  $t - 1$  indicam os passos de tempo atual e anterior, respectivamente [s];  $QS_m$  é a descarga sólida (silte ou argila) proveniente da mini-bacia associada ao trecho de rio [t/s] e  $QS_{fl}$  é a descarga sólida entre o rio e a planície de inundação [t/s].

Segundo Buarque (2015) o transporte das partículas de areia nos trechos de rio é realizado utilizando a equação da continuidade de sedimentos, também chamada de equação de Exner (CHANG, 1998).

$$(1 - \lambda) \frac{\partial A_b}{\partial t} + \frac{\partial Q_s}{\partial x} - q_{sm} = 0$$

*Equação 21*

Na qual,  $A_b$  é a área transversal de um “reservatório de sedimentos de fundo” correspondente ao volume depositado ou erodido no trecho [m<sup>2</sup>];  $Q_s$  é a descarga sólida de sedimentos do leito [t/s];  $q_{sm}$  é a contribuição lateral de sedimentos da mini-bacia [t/m.s];  $\lambda$  é a porosidade do depósito [adimensional];  $x$  é a distância na direção do escoamento [m] e  $t$  é o tempo [s].

### 2.7.3.3 Módulo Planície

Nos trechos de rio onde é adotado o método hidrodinâmico (PAIVA, 2009), incorporado ao MGB-IPH o modelo de sedimentos permite a troca de cargas em suspensão entre os rios e as planícies de inundação assumindo uma mistura completa de sedimentos nas planícies, de forma que as concentrações são constantes na vertical para cada classe de partículas (BUARQUE, 2015).

Segundo Buarque (2015), onde a velocidade longitudinal do escoamento na planície é nula, apenas a troca lateral entre rios e planícies é permitida. Desta forma as planícies funcionam apenas como áreas de armazenamento de sedimentos finos trocados com o rio principal.

### **2.8 Comentários Finais Sobre a Revisão Bibliográfica**

Os estudos relativos à hidrossedimentologia e a dinâmica de transporte de sedimentos são de grande importância no que diz respeito ao manejo e a gestão de recursos hídricos no âmbito de bacias hidrográficas em no contexto de engenharia hídrica. Estudos e simulações hidrossedimentológicas, com o auxílio de modelos matemáticos, em áreas de grande escala vem apresentando notório desenvolvimento e necessidade no que diz respeito à tomada de decisões integradas em no âmbito das grandes bacias brasileiras. A ausência espacial e temporal de dados necessários a calibração e validação de modelos apresenta-se como um grande empecilho na produção de bons resultados em modelagem de grandes áreas o que faz necessário e justifica o desenvolvimento de métricas alternativas de geração de dados hidrossedimentológicos.

Neste contexto, este trabalho apresenta caráter interessante, pois tem como objetivo não só avaliar o desempenho de um modelo recentemente desenvolvido para simular a dinâmica de sedimentos em grandes bacias, mas também avaliar uma métrica alternativa de geração de dados para auxiliar na calibração e validação de modelos.

### 3. ÁREA DE ESTUDO: A BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL

O MGB-SED foi aplicado como estudo de caso na bacia do rio Paraíba do Sul, uma grande bacia brasileira situada entre três estados de grande importância no cenário nacional. A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul atravessa os estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, ocupando uma área de aproximadamente 57.000 km<sup>2</sup> referentes a 184 municípios. Levando em conta a extensão de cada estado, a situação geográfica da bacia e dos usos da água, o Rio de Janeiro é onde a bacia adquire maior importância relativa, tendo em vista que ocupa metade da área de todo o estado, situa-se a jusante dos outros dois estados, recebendo os impactos dos usos da terra e da água, e é utilizada para abastecer de água e energia cerca de 80% da sua própria população (MARENGO & ALVES, 2005; CAMPOS, 2001).

É importante destacar que essa bacia está localizada em uma das áreas mais industrializadas do país, responsável pela arrecadação de uma grande parte do PIB Nacional, portanto uma área relevante para a implementação de políticas nacionais de recursos hídricos. O rio Paraíba do Sul percorre aproximadamente 1.180km de sua nascente até sua foz e em seu curso apresenta diferentes características físicas relacionadas à altitude, declividade, regime de chuvas, sinuosidades, transporte de sedimentos etc. (MARENGO & ALVES, 2005). A Figura 9 apresenta um mapa de localização da bacia.

O processo de degradação ambiental da bacia do rio Paraíba do Sul se desencadeia desde o século XVII, quando a cobertura vegetal começou a ser retirada para implantação de culturas de cana de açúcar e posteriormente com o ciclo do café entre os séculos XVIII e XIX. Por esta época a redução da cobertura vegetal já se fazia perceber, com o surgimento de problemas originados pela erosão acelerada, assoreamento de rios e perda de fertilidade do solo. Atualmente a bacia está consideravelmente descaracterizada em relação às condições ambientais originais, não somente pela devastação quase total da cobertura vegetal, mas também pela expansão urbanas e industrial e a construção de barragens (INEA, 2010).

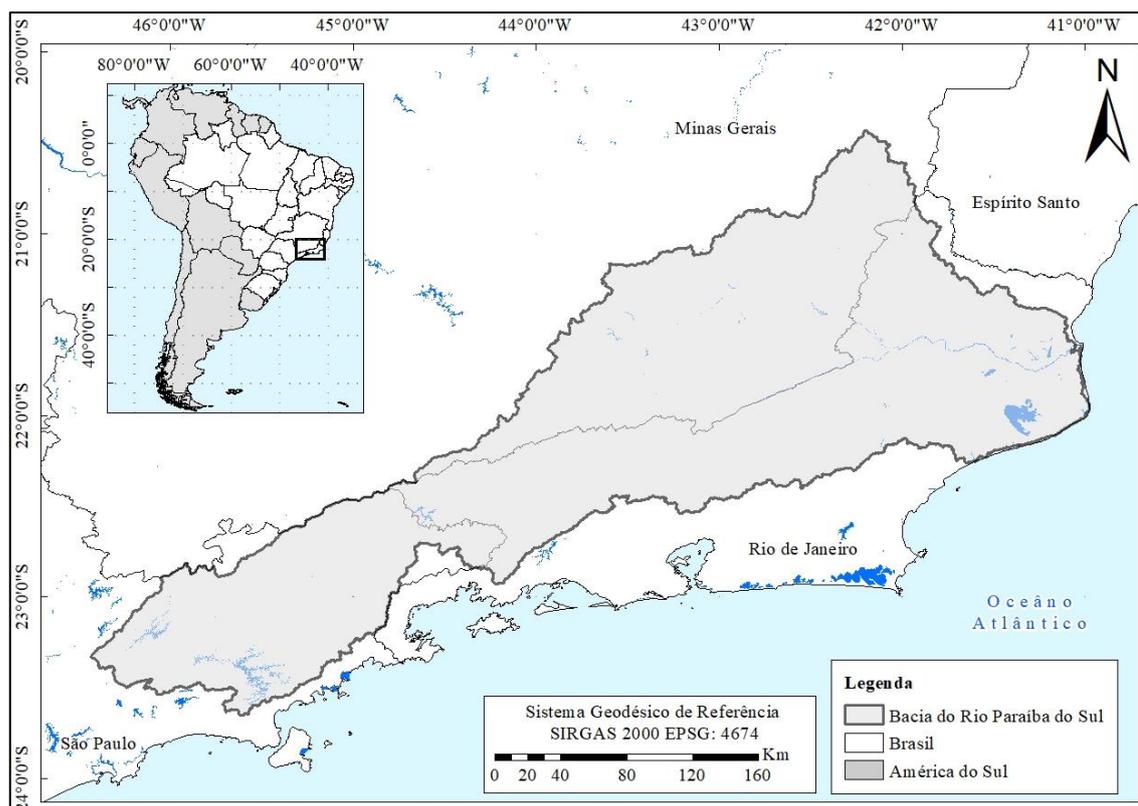
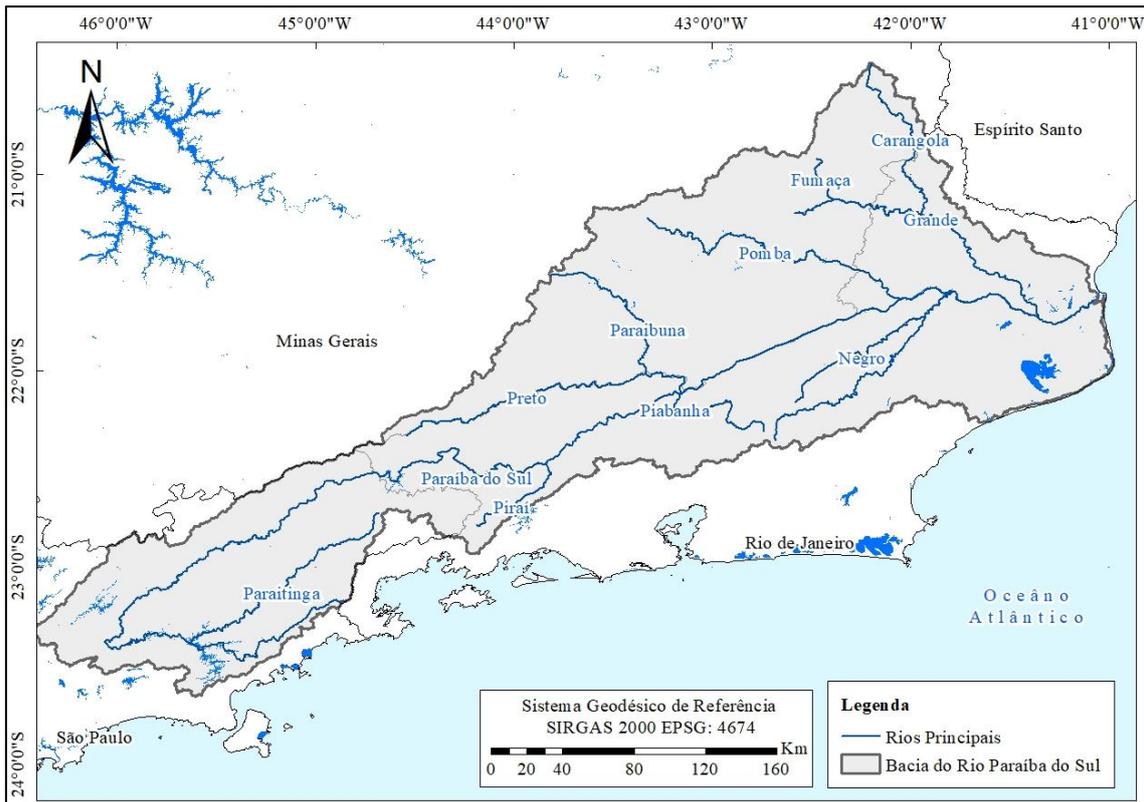


Figura 9 - Mapa de localização da bacia do rio Paraíba do Sul.

### 3.1 Caracterização Geral da Bacia

O rio Paraíba do sul é formado pela união dos rios Paraíba e Paraitinga, na serra do Mar, no estado de São Paulo, e o seu comprimento, calculado a partir da nascente do rio Paraitinga até o seu deságue no mar, no município de São João da Barra – RJ, é de mais de 1.100 km. Os principais afluentes da margem esquerda são: Rio Preto, Paraíba, Pomba e Muriaé. Os principais afluentes da margem direita são: Rio Piabanha e Dois Rios (união entre os rios Negro e Grande) (AGEVAP, 2014a). A Figura 10 apresenta a localização dos principais rios na bacia.

A bacia do rio Paraíba do Sul possui uma forma alongada, de 1.200 km de comprimento, cerca de três vezes maior do que a sua largura máxima. Situa-se em uma das poucas regiões do país de relevo muito acidentado, de colinoso a montanhoso que chega a mais de 2.000 metros nos pontos mais elevados e distribui-se na direção Leste-Oeste entre as serras do Mar e da Mantiqueira. Das poucas áreas planas existentes destacam-se as seguintes: o delta do Paraíba, representando por uma extensa planície flúvio-marinha e ao longo do rio Paraíba do Sul e de alguns de seus maiores afluentes, planícies fluviais, pouco extensas (CAMPOS, 2001).



*Figura 10 - Principais rios da bacia do Paraíba do Sul.*

A Figura 11 apresenta o relevo da bacia onde podem ser observadas as altas elevações da serra da Mantiqueira e das Serras do Mar e as áreas planas da bacia.

No âmbito do comitê para a integração da bacia do rio Paraíba do sul, os segmentos do estado, municípios e da sociedade civil, representando as diferentes formas de organizações das bacias hidrográficas em SP, RJ e MG, vem sendo estabelecido um processo de gestão e planejamento participativo dos recursos hídricos da bacia. Neste contexto a bacia possui um total de oito unidades hidrográficas de gestão que configuram áreas de abrangência dos Comitês de Bacias Hidrográficas Afluentes (CBH's), também entendidos como unidades de planejamento, visando futuros planos de ação de recursos hídricos (AGEVAP, 2014a). A Figura 12 apresenta a localização das oito unidades hidrográficas de gestão da bacia do rio Paraíba do Sul.

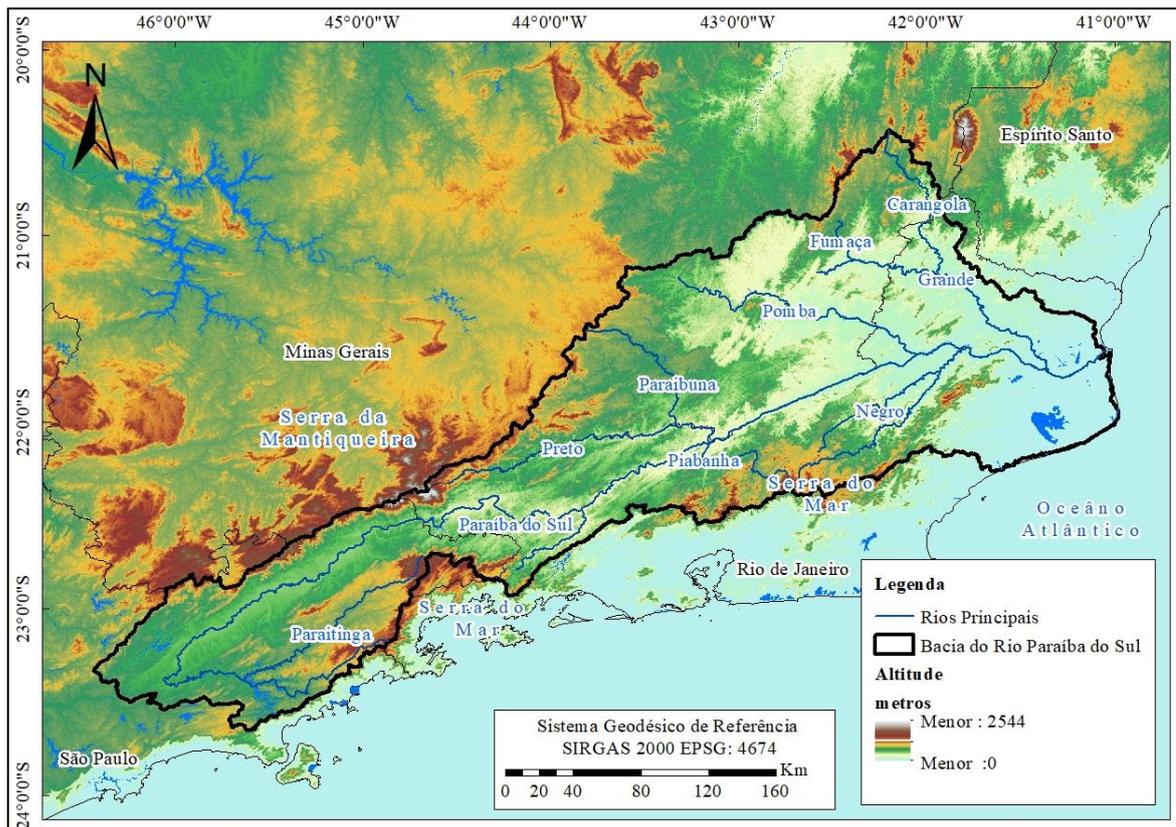


Figura 11 - Relevo da bacia do rio Paraíba do Sul.

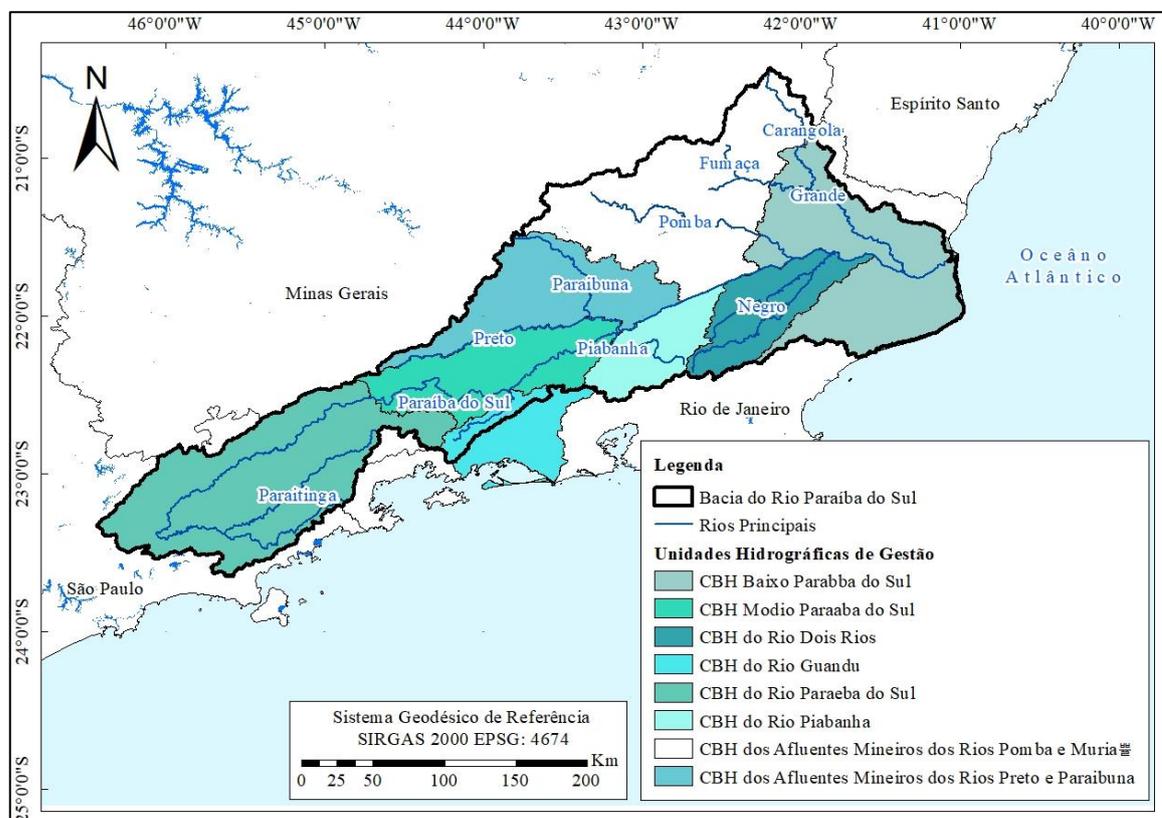


Figura 12 - Unidades de gestão da bacia do rio Paraíba do Sul.

A região da bacia do Paraíba do sul é caracterizada por clima predominantemente tropical, quente e úmido, com variações determinadas pelas diferenças de altitude e entradas de vento marinho. As temperaturas médias anuais oscilam entre 18° e 24°C e as máximas precipitações ocorrem nas cabeceiras minerais da bacia e nos pontos mais altos das serras do Mar e da Mantiqueira, chegando a valores de 2.250 mm/ano. O período de verão é caracterizado como chuvoso com precipitação acumulada entre 200 e 250 mm/mês nos meses de máximas precipitações (dezembro e janeiro), enquanto no inverno, ocorre o período mais seco, com precipitações acumuladas inferiores a 50 mm/mês. Quanto aos recursos hídricos, em termos quantitativos, a agricultura possui o uso mais relevante quando comparado com abastecimento doméstico e uso industrial. Entretanto, a agricultura está perdendo significância devido ao relevo pouco favorável, a degradação dos solos e a expansão urbana. (CAMPOS, 2001; AGEVAP, 2014a; SOARES, 2005).

### 3.2 Caracterização dos Impactos Hidrossedimentológicos da Bacia

A bacia do rio Paraíba do Sul, localizada em uma região de relevo acidentado com poucas áreas planas, caracteriza-se por uma drástica redução da cobertura florestal natural e por apresentar formas de uso do solo inadequadas às condições de relevo e solos (desde a expansão da monocultura cafeeira, no século XIX), que configuraram um cenário generalizado de processos intensos de erosão, com estágios avançados de degradação em diversas áreas da bacia. Esses processos contribuem diretamente para o desenvolvimento das erosões lineares, que ocorrem em diversos setores das vertentes, abrangendo praticamente todas as sub-bacias que compõem a bacia do rio Paraíba do Sul (AGEVAP, 2007; 2014a).

Em face das diversidades do meio físico, os processos erosivos na bacia do Paraíba do Sul atuam de forma diferenciada dependendo dos fatores naturais e antropogênicos envolvidos necessitando de uma abordagem espacial (AGEVAP, 2014a). Neste sentido, as técnicas de geoprocessamento em ambiente SIG apresentam um enorme potencial de utilização. Trabalhos têm sido realizados por pesquisadores da região utilizando princípios de álgebra de mapas para estabelecimento de locais com diferentes graus de vulnerabilidade à erosão (CAMARINHA, 2011; CANAVESI *et al.*, 2013), porém, estes trabalhos analisam apenas áreas específicas e não consideram a bacia do rio Paraíba do Sul como um todo (AGEVAP, 2014a).

Convém ressaltar que as medições sedimentométricas disponíveis na bacia do rio Paraíba do Sul apresentam períodos curtos, baixa frequência de medições, e em geral, percebe-se que não foi dada continuidade em campanhas de campo. Além disso, destaca-se a influência de diversos reservatórios existentes na bacia, que retém grande parte dos sedimentos aportados. Recomenda-se, portanto, que seja elaborado um programa de monitoramento e informações compatíveis com o nível de detalhe exigido em estudos dessa natureza (AGEVAP, 2007).

A atividade mineral, especialmente a extração de areia e argila, é também responsável por erosão e degradação dos corpos de água da bacia. No trecho paulista, esse é um dos mais graves problemas ambientais. A região compreendida pelo chamado médio vale do Paraíba, entre o trecho paulista e o trecho fluminense, é uma das mais críticas quanto à ocorrência de erosão acelerada, com muitas ravinas e voçorocas ao longo de íngremes encostas cobertas por ralas pastagens (AGEVAP, 2007).

A degradação dos corpos hídricos por assoreamento inicia-se com os processos de erosão natural nas encostas, sendo em geral agravados por desmatamentos, cortes, aterros, exposição do solo etc. Além do assoreamento e sedimentos em suspensão, o rio Paraíba do Sul está também sujeito a profundas alterações em seu regime hidráulico e na produção de sedimentos, devido à prática de encurtamentos do canal pelos cortes de meandros, e aumento da declividade do canal (SOUZA JR., 2004).

### **3.3 Justificativa de Escolha da Bacia Como Estudo de Caso**

A partir das considerações feitas nos itens anteriores, justifica-se a escolha da bacia do rio Paraíba do Sul, como estudo de caso deste trabalho, de acordo com os itens que seguem:

- A bacia exibe uma forma alongada muito particular, diferentes da maioria das bacias brasileiras e diferente daquelas as quais o modelo de sedimentos foi aplicado anteriormente.
- A bacia se encontra em uma região densamente povoada e de extrema importância no cenário econômico brasileiro, o que justificar a necessidade de fomentação de estudo referentes ao manejo e gestão de recursos hídricos.

- A bacia possui grande escassez de dados sedimentométricos de maneira espacial e temporal, sendo assim indicada para a concepção de métricas alternativas de geração de dados para calibração e validação de modelos hidrossedimentológicos.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

De especial interesse à metodologia deste trabalho é a utilização do modelo de sedimentos MGB-SED (BUARQUE, 2015) e do modelo hidrológico MGB-IPH (COLLISCHONN, 2001) que foi simulado previamente para fornecer dados simulados de vazões para o modelo de sedimentos. Em virtude da escassez de dados medidos de sedimento e da sua má distribuição temporal e espacial a proposta de metodologia visa contribuir para o aprimoramento das métricas de calibração e validação de modelos hidrossedimentológicos com o auxílio de dados de sensoriamento remoto de acordo com a métrica proposta por Fagundes (2018), na qual os dados de reflectância da superfície na banda do vermelho são correlacionados às simulações do MGB-SED, auxiliando na calibração e validação do modelo.

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. Na primeira etapa se encontra o detalhamento do processo de aquisição de dados, necessários a todas as etapas de modelagem do trabalho, desde o pré-processamento de dados, a simulação no modelo hidrológico (MGB-IPH) e a simulação de sedimentos com o modelo MGB-SED. A seguir, há a preparação e calibração do modelo hidrológicos, descrevendo, de forma reproduzível, todo o processo de pré-processamento de dados, simulação, calibração e validação do modelo hidrológico MGB-IPH. Por fim há a preparação e calibração do modelo de sedimentos, descrevendo o processo de extração da concentração de sedimentos em suspensão (CSS) da reflectância espectral da banda do vermelho de imagens de satélite, a definição dos parâmetros iniciais da equação MUSLE e a calibração e validação do modelo. A Figura 13 apresenta um fluxograma que apresenta, resumidamente, a metodologia do trabalho.

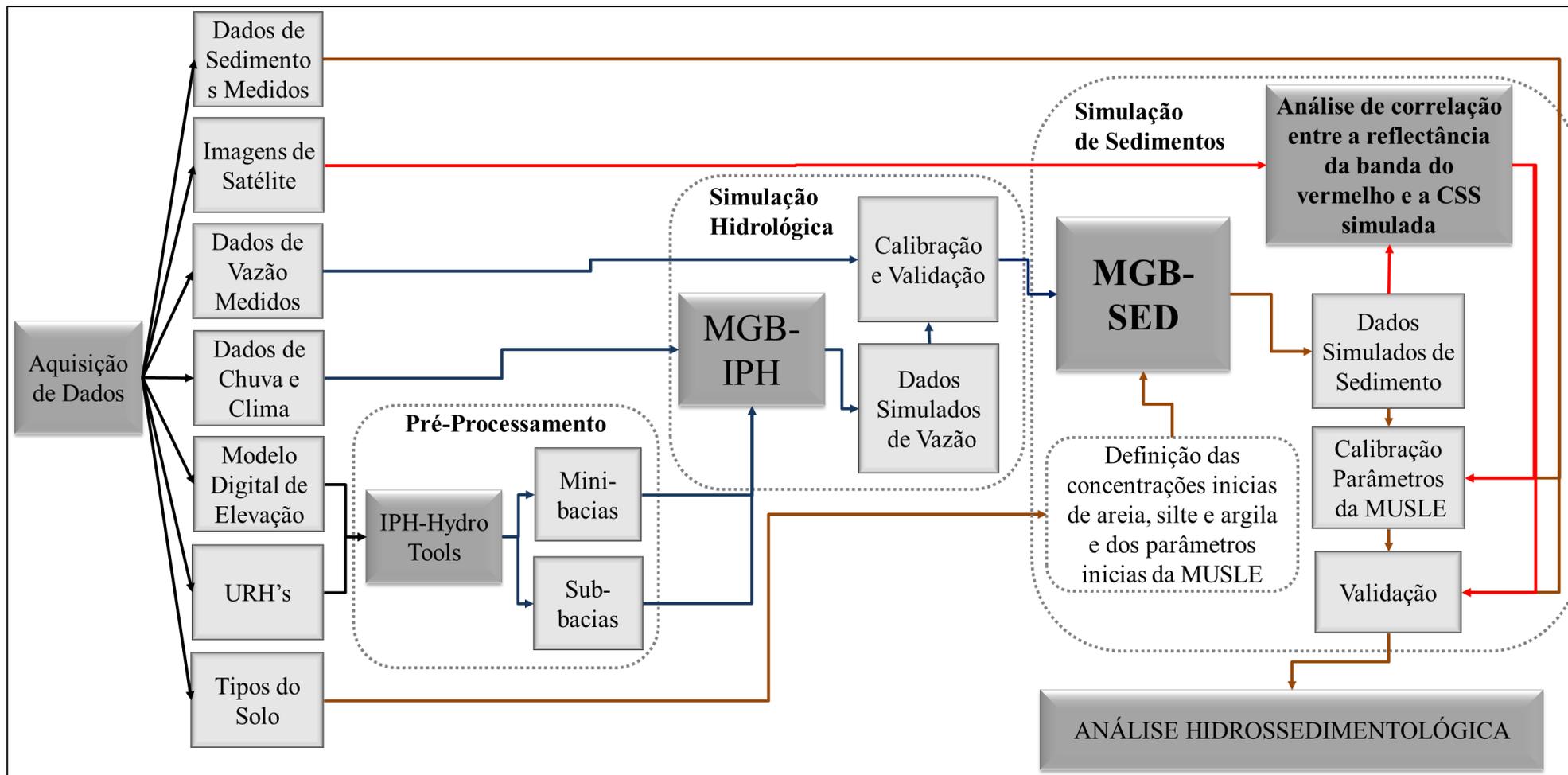


Figura 13 - Fluxograma da metodologia empregada no estudo.

### 4.1 Aquisição do Banco de Dados

A etapa de aquisição de dados foi a primeira etapa a ser realizada no trabalho. Os itens abaixo destinam-se a descrever todas as etapas de aquisição de dados necessários as simulações dos modelos hidrológico (MGB-IPH) e de sedimentos (MGB-SED) bem como o método de aquisição de dados de imagens de satélite utilizado.

#### 4.1.1 Modelo Digital de Elevação e Dados do Solo

O Modelo Digital de Elevação (MDE) foi obtido através dos dados gerados a partir do SRTM (*shuttle Radar Topography Mission* – FARR *et al.*, 2007) com resolução espacial de 30 metros. Os dados, em resolução de 30 metros são disponibilizados em torno do globo terrestre de grades quadradas divididas a cada um grau decimal. Para representar a bacia do rio Paraíba do Sul foram utilizadas 19 grades que foram posteriormente unidas através de ferramentas de geoprocessamento. A Figura 14 apresenta o MDE para a região da bacia de estudo bem como as 19 grades necessárias para compô-lo.

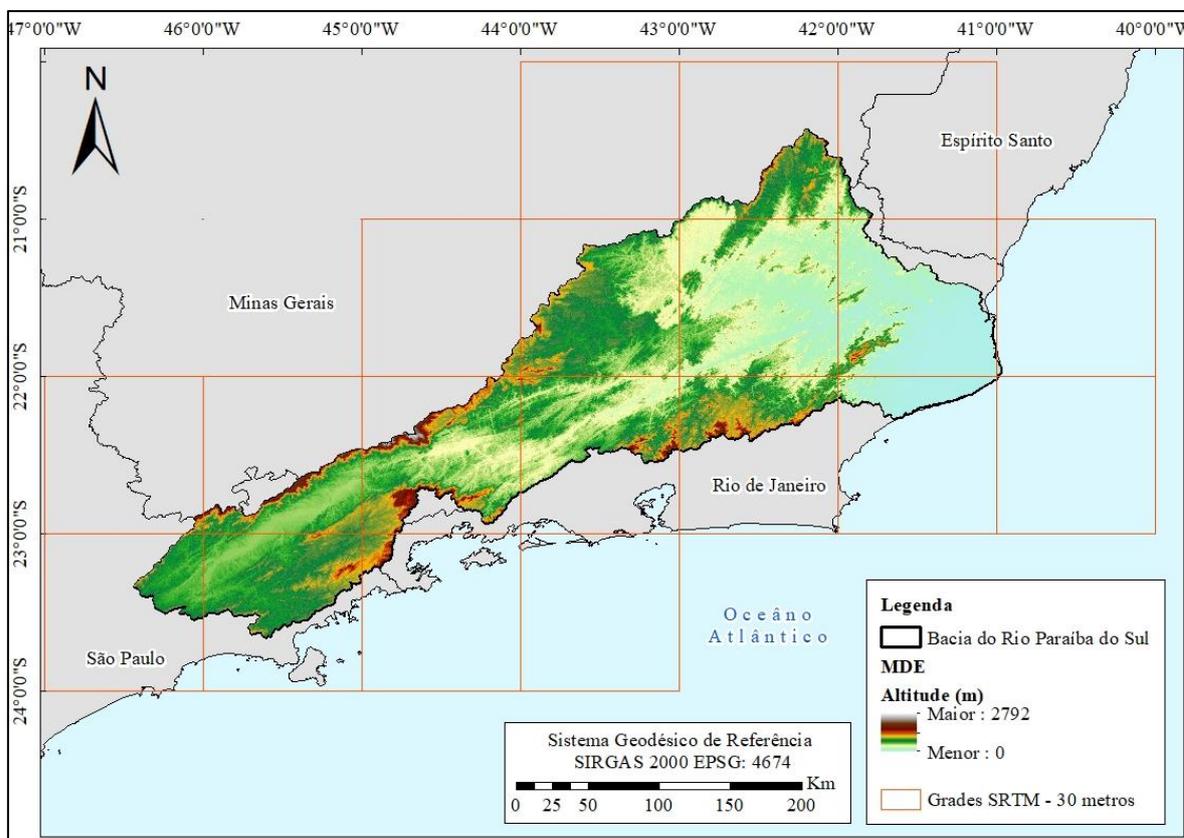


Figura 14 - Modelo Digital de Elevação para a região da bacia do rio Paraíba do Sul.

(FONTE: Adaptado de: Farr *et al.*, 2007)

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, 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 URH's desenvolvido por Fan *et al.* (2015), para toda a América Latina, em resolução espacial de 400 metros que apresenta bons resultados associados ao modelo hidrológico MGB-IPH. O mapa foi elaborado com base em mapas de tipos de solo da FAO (FAO, 2003), do projeto RADAM BRASIL, e outros produtos mais detalhados de alguns estados brasileiros (FAN *et al.*, 2015). A Figura 15 apresenta as URH's extraídas para a região da bacia a partir do mapa.

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, 2003), 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), Ph do solo, porcentagens de nitrogênio etc. a Figura 16 apresenta os tipos de solo FAO extraídos para a região da bacia de acordo com associações aproximadas aos tipos de solo da EMBRAPA contidas no “Apêndice I” do Sistema de Classificação de Solos (SiBCS – EMBRAPA, 2006). Essas associações serão necessárias para realizar estimativas referentes as frações de silte, argila e areia para cada Unidade de Resposta Hidrológica da bacia e o processo será explicado em maior detalhes no item 4.3 de preparação e calibração do modelo de sedimentos.

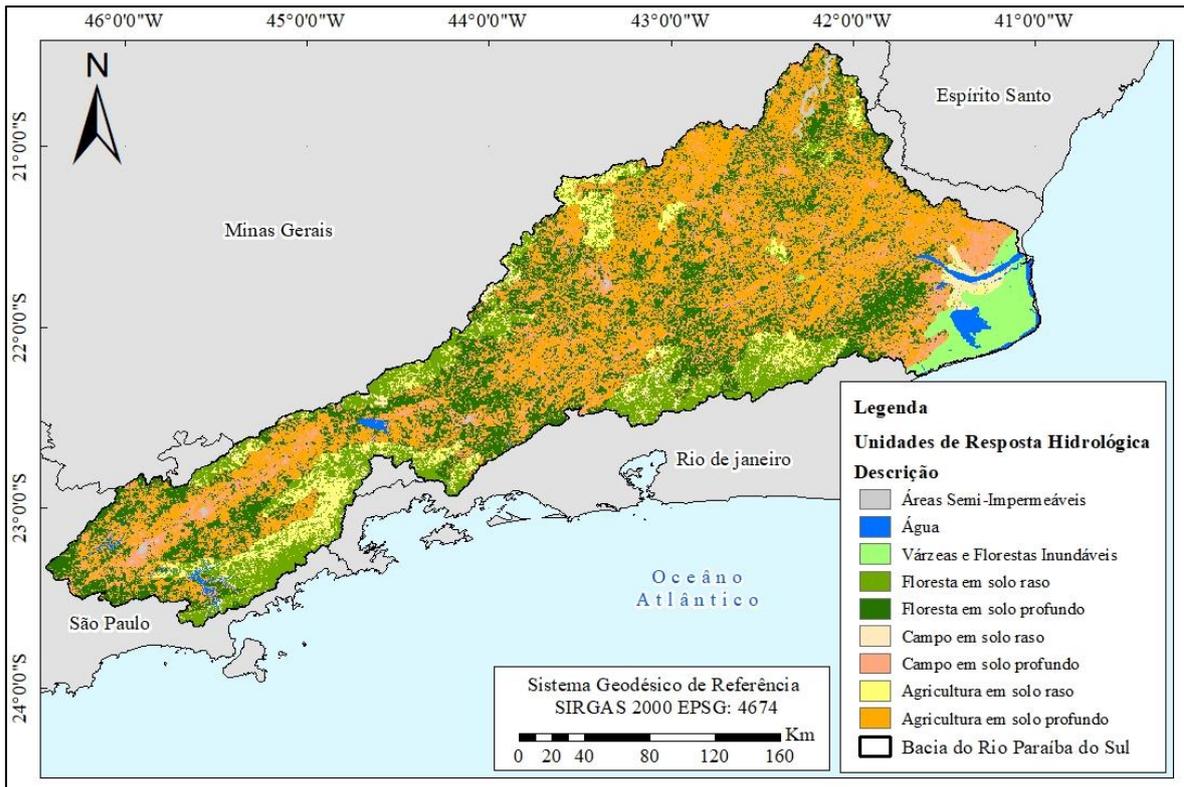


Figura 15 – Unidades de Resposta Hidrológica na bacia do rio Paraíba do Sul.

(FONTE: Adaptado de: Fan et al., 2015).

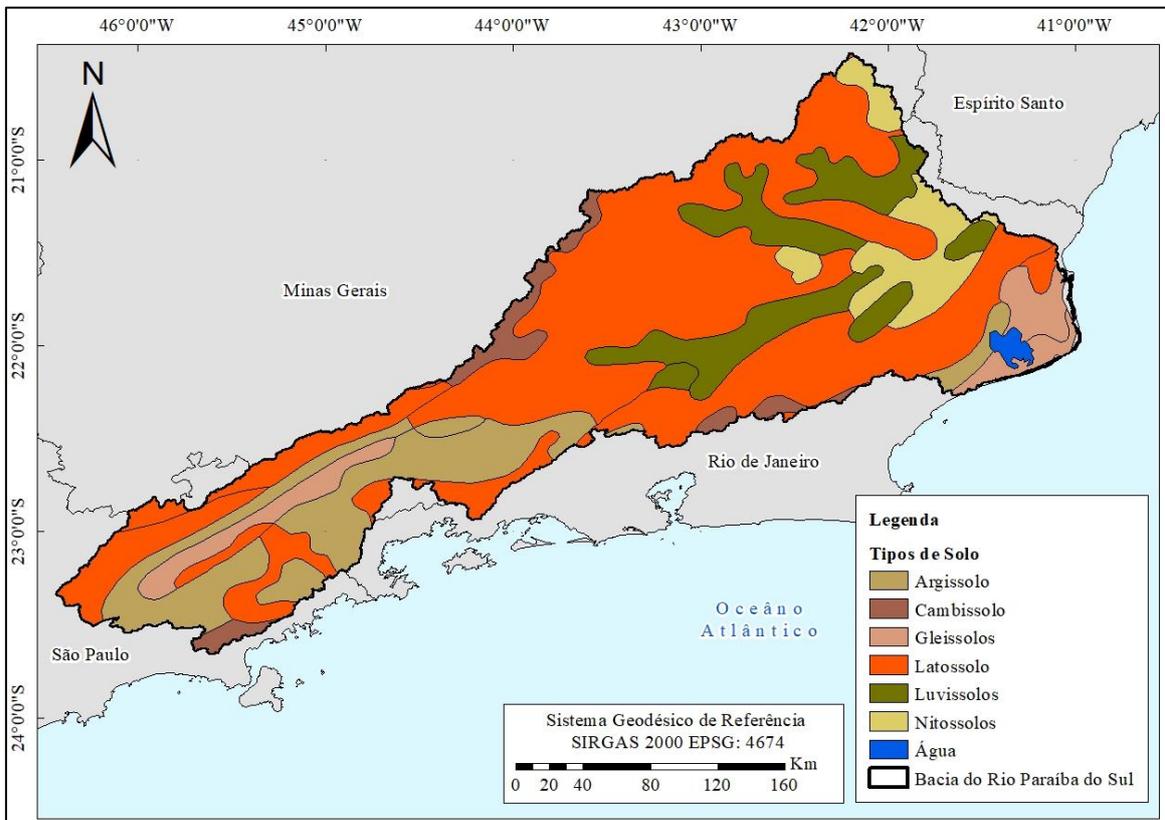


Figura 16 – Tipos de Solo FAO associados às classes de solo EMBRAPA.

(FONTE: Adaptado de: FAO, 2003).

#### 4.1.2 Dados Medidos

Para a realização das simulações do modelo hidrológico foi necessário obter levantamentos de clima e de chuva que representam os dados de entrada do modelo MGB-IPH. Os dados foram obtidos, em escala diária, do sistema *Hidroweb* (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb>) mantido pela Agência Nacional de Águas (ANA). Os dados foram baixados através 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). Os dados de chuvas foram baixados para a região próxima à bacia, incluindo dados fora da bacia. Uma grande quantidade de dados foi baixada através da ferramenta e posteriormente os dados foram analisados quanto à 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. Ao todo foram utilizados 440 postos que se dispõem ao redor da bacia de acordo com a Figura 17.

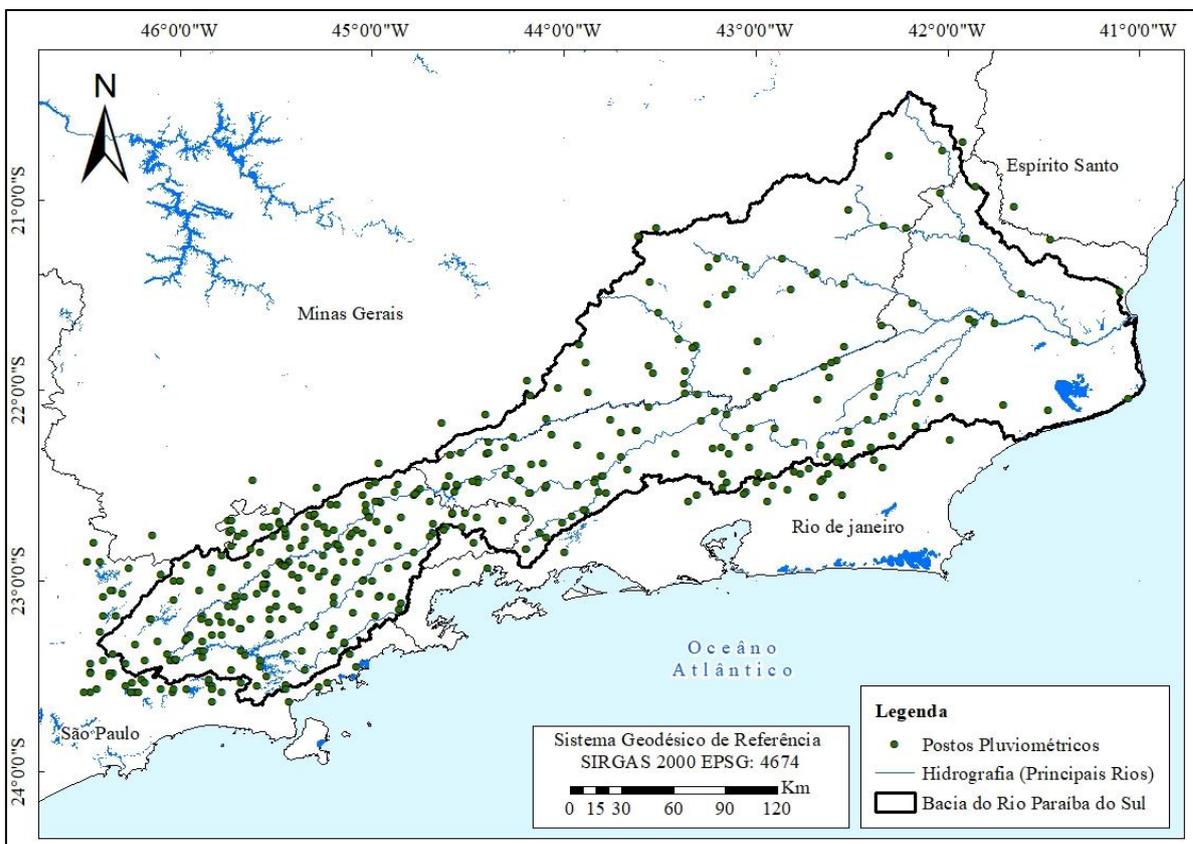
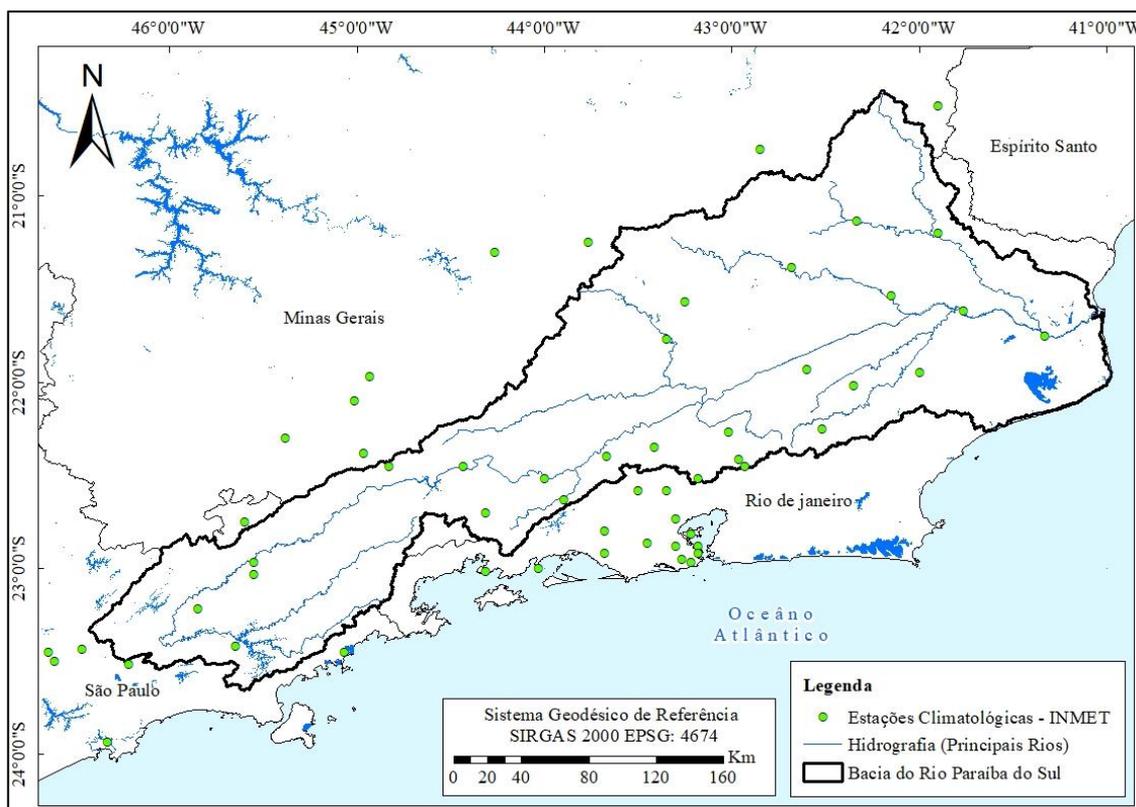


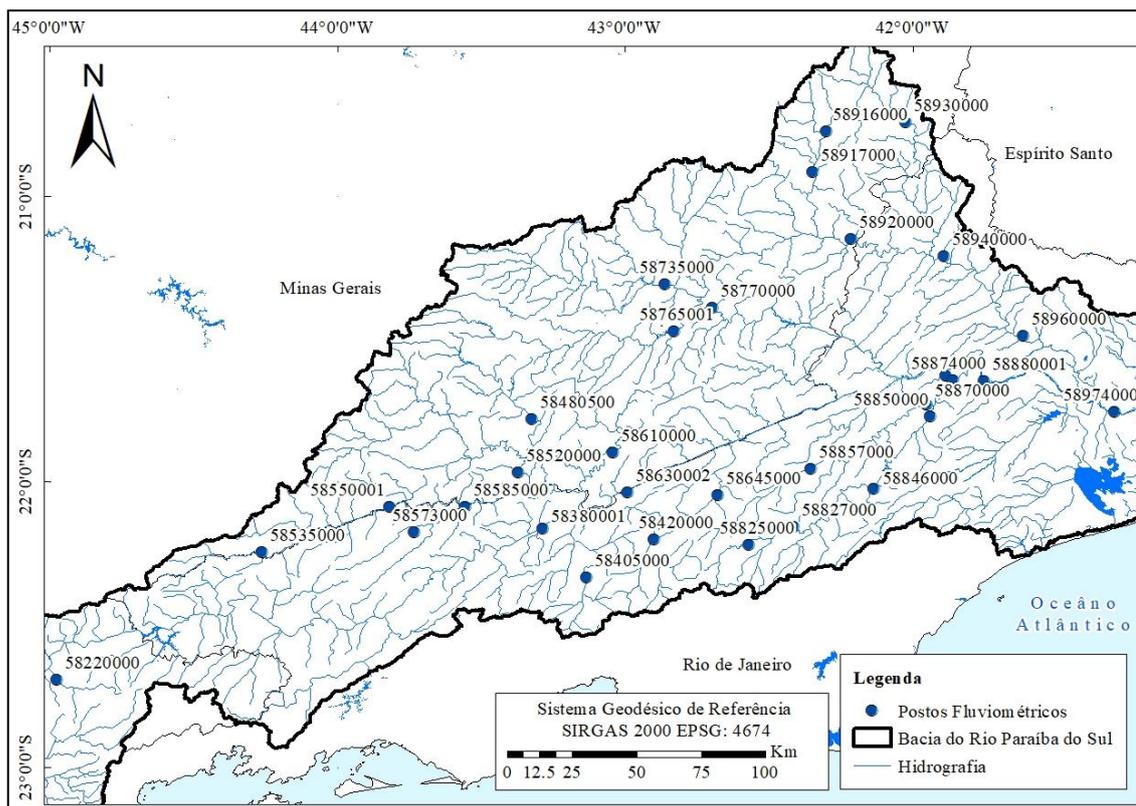
Figura 17 – Localização dos postos pluviométricos selecionados para a modelagem hidrológica.

Os dados de clima referem-se à temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosféricas e insolação e foram obtidos através do próprio bando de dados interno do modelo que possui dados de normais climatológicas de 1960 a 1990, calculadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para todo o território brasileiro. Ao todo foram utilizados dados de 56 estações meteorológicas próximas à região de bacia, de acordo com a Figura 18.



*Figura 18 – Localização das estações climatológicas utilizada para a composição das normais climatológicas da modelagem hidrológica.*

Para representação da acurácia, calibração e validação dos modelos simulados, tanto de sedimento quanto hidrológico, 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 interna 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 32 postos fluviométricos que apresentavam melhor distribuição espacial na bacia, representatividade dos principais rios da bacia, variações da área de drenagem à montante e 100% de dados medidos, sem falhas em um longo período de tempo. A Figura 19 apresenta a distribuição espacial dos postos escolhidos na bacia.



*Figura 19 – Localização dos postos fluviométricos existentes na bacia do rio Paraíba do Sul com longo período de dados contínuos observados.*

Os dados de sedimentos foram obtidos através de um pedido via e-mail junto à Agência Nacional de Águas. Respondendo à solicitação a agência enviou um arquivo de dados compilados com todas as medições existentes em seu banco de dados de estações de monitoramento do interior da bacia do rio Paraíba do sul, incluindo todas as medições de sedimento existentes e seus respectivos postos de medição. Ao todo existem na bacia 37 postos registrados com medições sedimentométricas e se dispõem na região da bacia de acordo com a Figura 20.

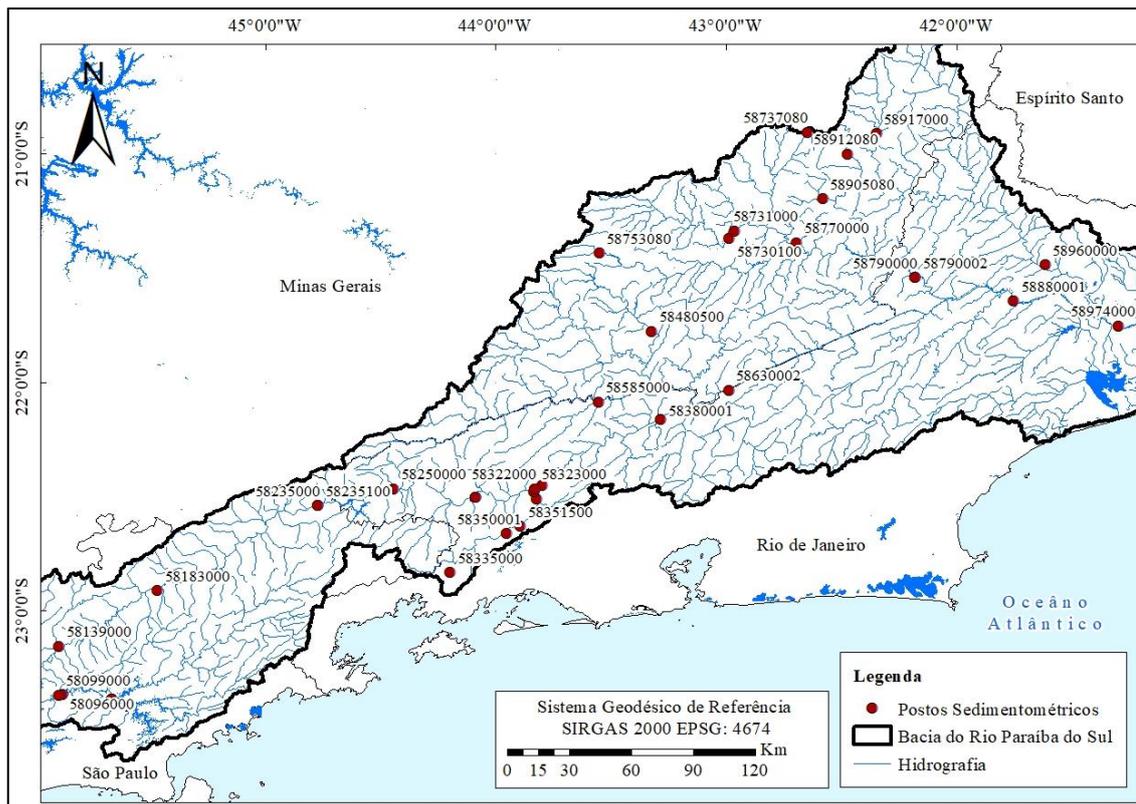


Figura 20 – Localização dos postos Sedimentométricos existentes na bacia do rio Paraíba do Sul.

#### 4.1.3 Dados de Imagens de Satélite

De uma maneira convencional, para fazer uma análise de longo período de dados de sensoriamento remoto, é possível fazer uso da plataforma *Earth Explorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), disponibilizada através do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e realizar uma solicitação de imagens através de pedidos que não podem ultrapassar um total de 100 imagens. Nesta plataforma é possível solicitar imagens que já apresentam correções atmosféricas (reflectância espectral da superfície).

Inicialmente, para analisar os dados oriundos de sensoriamento remoto foram feitos 10 pedidos de imagens com correções atmosféricas dos satélites *Landsat 5, 7 e 8*. Esses satélites foram escolhidos devido à sua resolução espacial de 30 metros, passíveis de serem enquadrados dentro das margens do rio Paraíba do Sul e de alguns de seus afluentes. Os pedidos, após serem baixados, totalizaram 632 GB de dados dispostos em mais de 8.000 arquivos que representam a disponibilidade de dados dos satélites existentes para a região da bacia onde o rio Paraíba do Sul possui largura maior do que 30 metros. Devido à grande quantidade de dados obtidos e da dificuldade em escrever rotinas de extração de dados, foi decidido optar por um processo

alternativo, mais atual e avançada de processamento em nuvem para aquisição dos dados da reflectância espectral da superfície da banda do vermelho de imagens dos satélites *Landsat*.

Neste sentido, nos últimos anos, foi disponibilizado um novo método de aquisição de dados de produtos de sensoriamento remoto através da plataforma *Google Earth Engine* (GEE – GORELICK *et al.*, 2016). O GEE consiste em um banco de dados em avançada escala, no qual estão catalogados grande parte dos produtos de sensoriamento remoto disponíveis gratuitamente, como por exemplo, toda a coleção de satélites *Landsat*. Além disso o GEE também proporciona o acesso a este banco de dados de maneira remota, através de tecnologia de computação em nuvem, o que exclui a necessidade de downloads de grande quantidade de dados, reduz exponencialmente o tempo para manipulação de dados, conferindo assim um considerável aumento na capacidade de processamento de séries temporais de imagens (KAYSER & RUHOFF, 2019). A plataforma pode ser acessada através de um pedido de cadastro no link: <<https://earthengine.google.com/>>. A Figura 21 apresenta um exemplo do layout de visualização do ambiente de edição de código do GEE. A aquisição de dados funciona através de rotinas escritas em *JavaScript*, uma das mais difundidas linguagens de programação computacional.

Para o presente estudo foi escrita uma rotina elaborada especificamente para extrair dados da reflectância espectral da banda do vermelho dos sensores TM, ETM+ e OLI dos satélites *Landsat* 5, 7, 8, respectivamente, a partir de um *shapefile* de pontos com interesse em se extrair dados do exato *pixel* em que eles se localizam. A escolha dos pontos de interesse será melhor descrita no item 4.1.3 Abaixo estão descritas as principais funcionalidades da rotina:

- Definição do período de dados: função que se restringe a limitar o espaço de tempo de aquisição de dados de sensoriamento remoto que serão incorporados na rotina.
- Definição dos pontos a serem extraídos os dados: função que reconhece um arquivo *Shapefile* contendo os pontos de interesse de extração de dados. Esse arquivo deve ser previamente importado para dentro da plataforma do GEE onde recebe um identificador para reconhecimento na rotina.
- Definição das coleções de imagens de extração de dados: função que gera, a partir do período estipulado e da espacialização dos pontos de interesse, coleções contendo todas bandas das imagens do satélite escolhido, podendo assim ser

feito um filtro na porcentagem máxima de nuvens que a imagem pode ter para ser incorporado na coleção.

- Remoção de nuvens e sombra de nuvens: função que analisa se os pontos de interesse se encontram inseridos em *pixels* reconhecidos como nuvens ou sombras de nuvens a partir do arquivo de metadados de cada imagens de satélite. Em caso positivo, o dado da imagem não será extraído para o ponto.
- Junção das coleções: função que junta as coleções contendo todas as bandas das imagens de satélites que foram definidos como uma única coleção anteriormente.
- Coleção dos dados a serem extraídos: função que uni somente os dados que se tem interesse em extrair a partir dos pontos de interesse.
- Exportação de dados: função que exporta os dados definidos para extração, considerando o período selecionado e a região dos pontos de interesse.

Foram definidas coleções contendo todas as bandas dos satélites *Landsat 5, 7, 8*, sendo direcionada para exportação somente a banda correspondente à faixa de refletância do vermelho para cada satélite. As coleções de imagens selecionadas possuem a conversão de imagens brutas em refletância de superfície, incluindo a correções atmosféricas. O Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) utiliza o *software Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System (LEDAPS)*, que realiza o processamento em larga escala para toda coleção de imagens, incluindo: conversão de imagens brutas em refletância de Topo da Atmosfera (TOA), detecção de *pixels* com nuvens com base na refletância do TOA e conversão para refletância de superfície a partir da refletância de topo da atmosfera (SCHIMIDT, *et al.*, 2013). Os pontos de aquisição de dados foram definidos posteriormente na etapa de preparação e calibração do modelo de sedimentos.

A rotina completa se encontra no Apêndice I e possui comentários mais específicos acerca de suas funcionalidades.

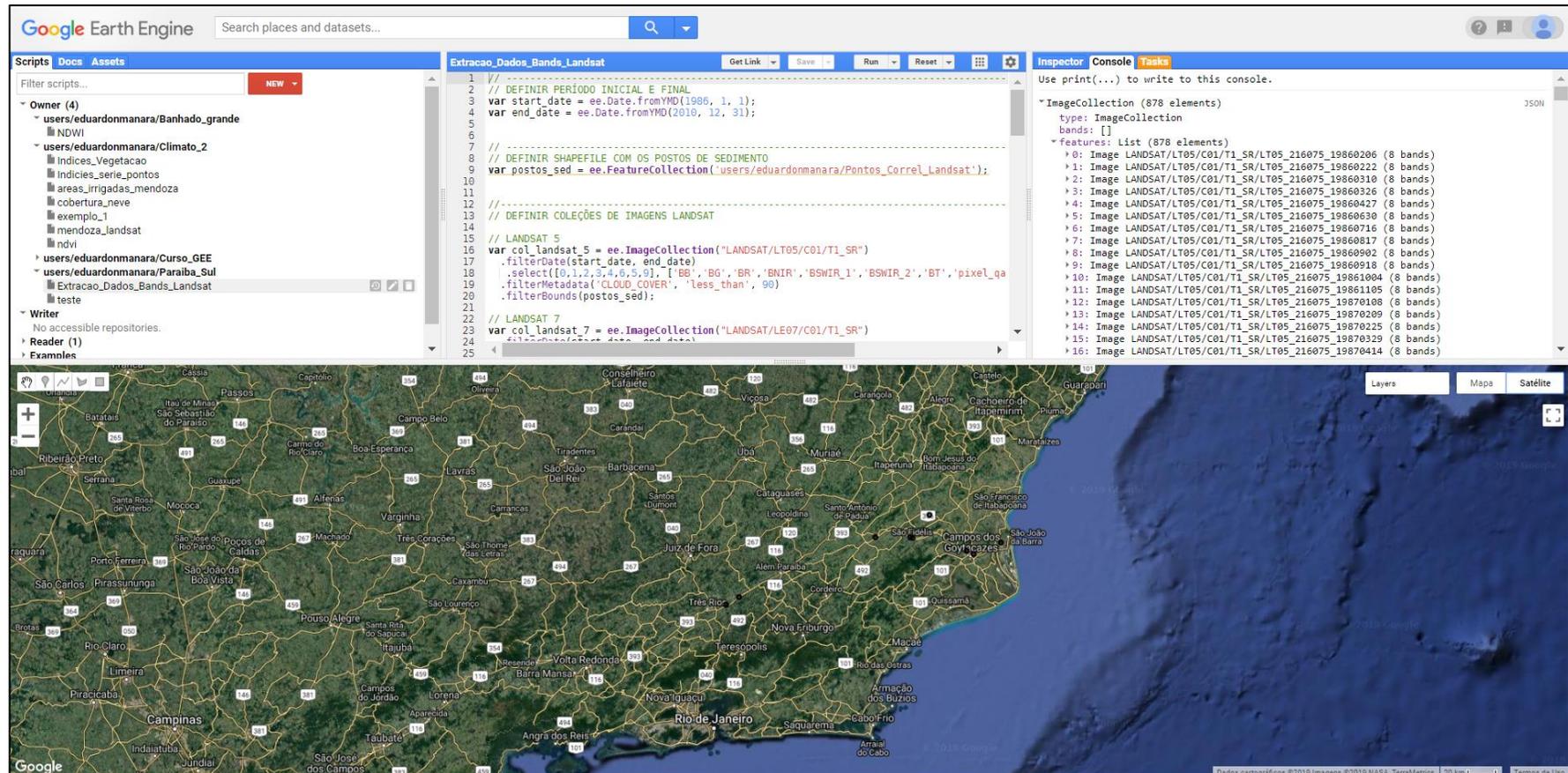


Figura 21 – Exemplo do layout de visualização do editor de código da plataforma Google Earth Engine

## 4.2 Preparação e Calibração do Modelo Hidrológico

Para que seja simulado, o modelo hidrológico MGB-IPH necessita de uma etapa de pré-processamento de dados na qual são definidas características físicas e espaciais da bacia, uma etapa de definição dos dados hidrológicos e climatológicos a serem utilizados a modelagem e uma etapa de calibração e validação dos dados simulados, de acordo com os itens que seguem.

### 4.2.1 Pré-Processamento de Dados

A partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), adquirido anteriormente, é gerada a rede de drenagem sintética da bacia, as mini-bacias de simulação do modelo e as sub-bacias de discretização dos parâmetros calibráveis do modelo. Lançando-se mão das ferramentas do *IPH - Hydro Tools* (SIQUEIRA *et al.*, 2015), primeiramente foi necessário remover as depressões existentes no MDE através do método *Modified Heuristic Search* (MHS). A partir do resultado são geradas as direções de fluxo (*Flow Direction*) e logo após as direções de fluxos acumulados (*Flow Accumulation*) da bacia. Para gerar a rede de drenagem, primeiramente é necessário definir um limiar de início de drenagem, que é expresso em um valor de área (km<sup>2</sup>), ou contagem de célula do MDE, a partir do qual o escoamento começa a ser gerado no canal. Quanto menor for o limiar, mais densa e detalhada será a rede de drenagem. Para o caso deste estudo o limiar definido foi de 10 km<sup>2</sup>, gerando uma rede suficientemente detalhada para representar os principais rios da bacia e alguns de seus afluentes. Mais sobre a métrica de definição do início da rede de drenagem pode ser obtido no estudo de Fan *et al.* (2013). A Figura 22 apresenta a rede de drenagem sintética resultante para a bacia do rio Paraíba do Sul.

Posteriormente, a rede de drenagem foi 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 (mini-bacias). Como a bacia do rio Paraíba do Sul é extensa, possui grande heterogeneidade quanto a características geológicas, geomorfológicas e pedológicas, a partir disso a bacia foi discretizada novamente em diferentes sub-bacias, geradas em função de áreas com grande similaridade de Unidades de Respostas Hidrológicas e também em função dos locais onde há dados de vazão medidos para a futura calibração do modelo.

A discretização da bacia resultou em um total de 3724 mini-bacias e 46 sub-bacias que se apresentam na bacia de acordo com a Figura 23.

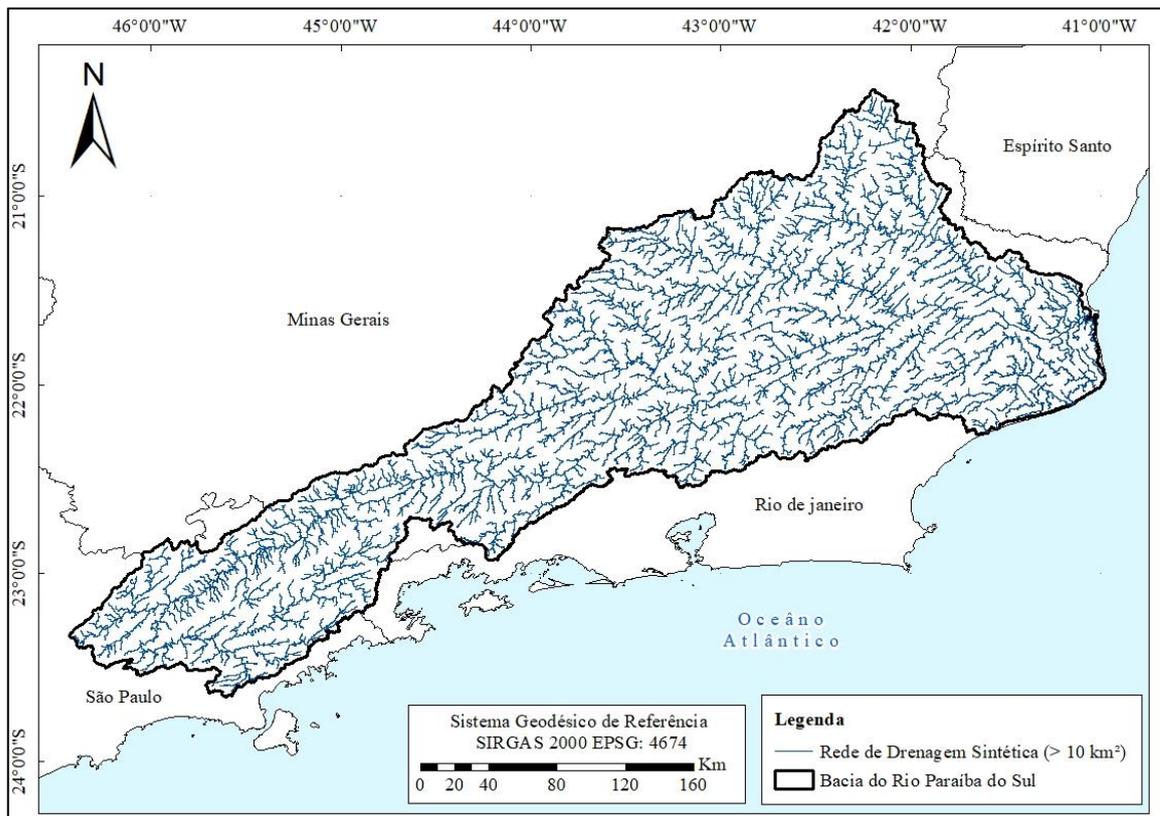


Figura 22 – Rede de drenagem sintética gerada a partir de um limiar de área mínima de 10km².

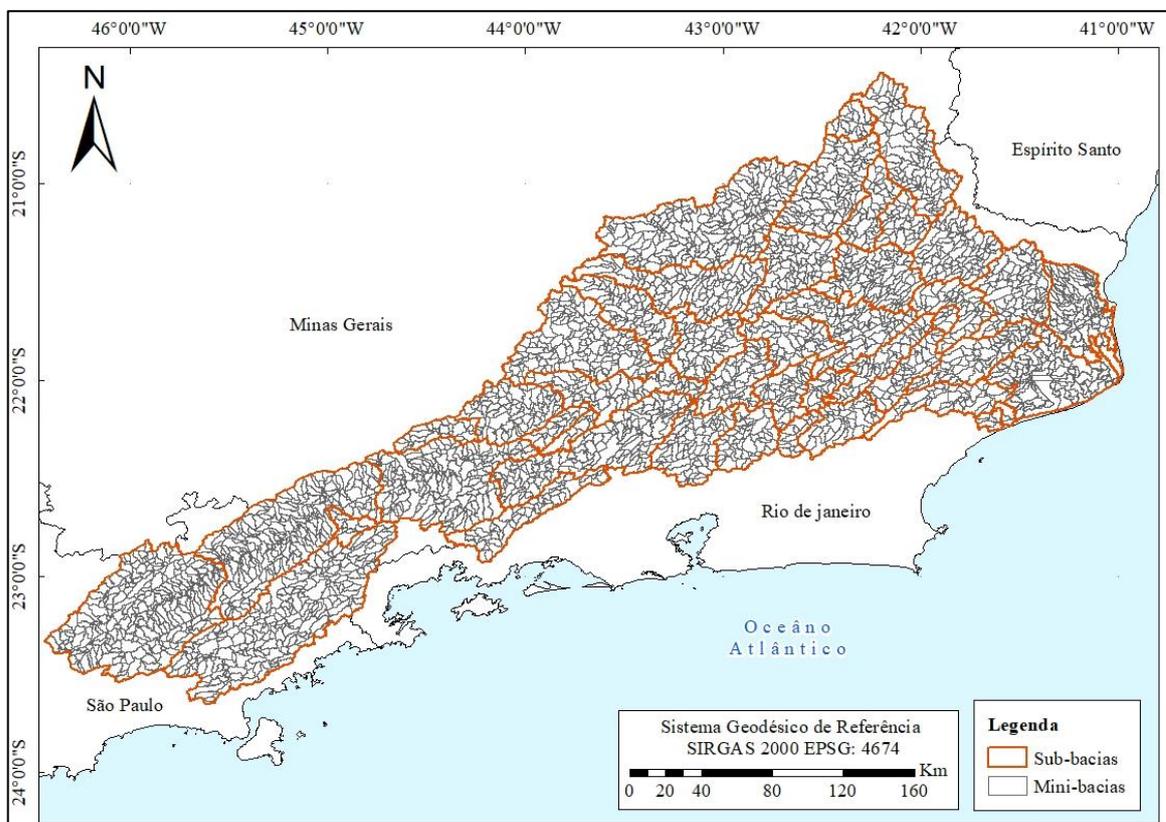


Figura 23 – Discretização da bacia do rio Paraíba do Sul em ini-bacias e sub-bacias.

#### 4.2.2 Definição dos Dados Hidrológicos e Meteorológicos

Após a etapa de pré-processamento da bacia foram definidos os dados de entrada e de calibração do modelo hidrológico. Todos os dados obtidos de postos pluviométricos na etapa de aquisição de dados foram utilizados e preparados para serem usados na simulação. Todos os dados de chuva foram interpolados com o método do inverso da distância ao quadrado a partir de uma ferramenta interna do modelo (*Interpolate Precipitation*) e especializados em escala de mini-bacia.

Todos os dados de vazão selecionados anteriormente foram utilizados nas etapas de calibração e validação do modelo MGB-IPH e a partir da disponibilidade dos dados foram definidos os períodos de calibração e validação do modelo de acordo com a Tabela 5. Esses períodos também foram considerados para o modelo de sedimentos MGB-SED.

*Tabela 5 – Períodos definidos de calibração e validação do modelo hidrológico*

Calibração	Validação
01/01/1979 - 01/01/2000	02/02/2000 - 31/12/2010

A grande maioria dos postos selecionados para análise do modelo hidrológico não apresentam medições de sedimento para calibração e validação futura do modelo de sedimentos. Porém estes postos foram considerados e utilizados a partir da premissa de que quanto melhores forem as simulações do modelo hidrológico melhores serão os dados de entrada para o modelo de sedimentos, facilitando a sua calibração e possivelmente melhorando os seus resultados.

Ao realizar a análise dos hidrogramas, de cada posto fluviométrico, percebeu-se que a parte mais alta da bacia do rio Paraíba do sul, entre a Serra da Mantiqueira e a Serra do maior, apresenta uma grande influência de reservatório e transposições de Usinas Hidrelétricas (UHE). As construções de aproveitamentos hidrelétricos e Elevatórias (UEL) durante o século XX no rio Paraíba do Sul modificaram suas características hidrológicas, sedimentológicas e morfológicas originais. Dentre elas, destaca-se a UEH Santa Cecília, Localizada na margem direita do rio Paraíba do Sul, no Rio de Janeiro. Cerca de dois terços do volume líquido que passa nesse trecho é desviado da calha do rio (JORDÃO *et al.*, 2018). A Figura 24 ilustra a grande presença dos aproveitamentos na parte alta da bacia.

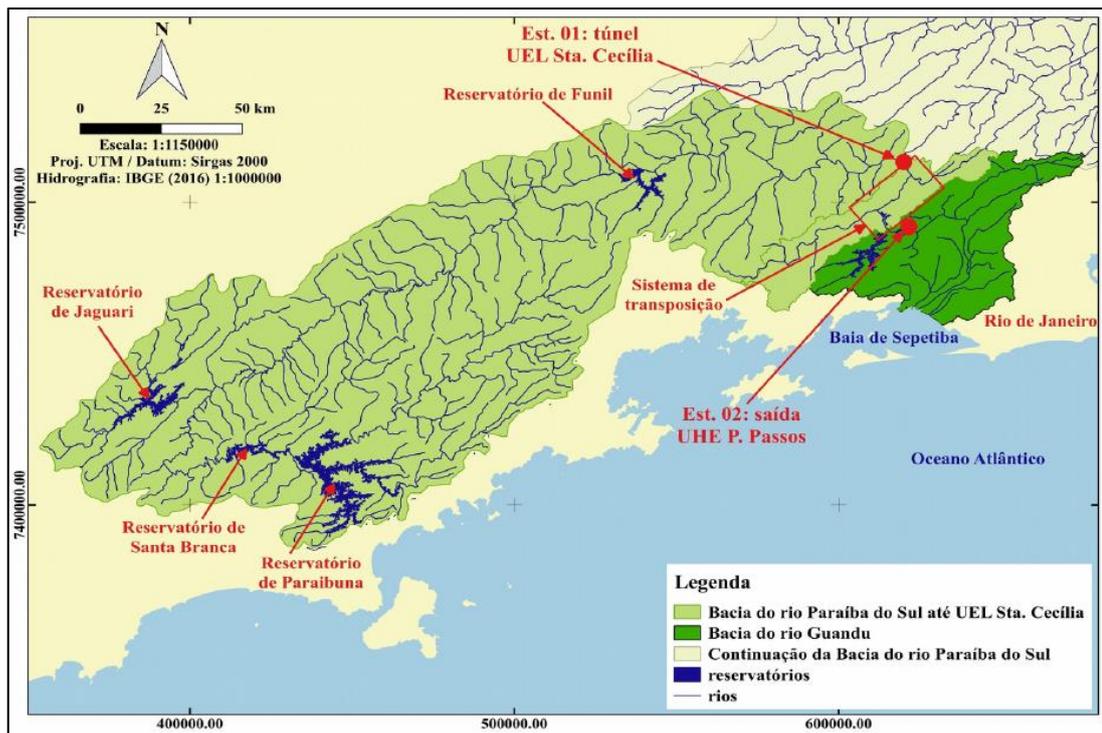
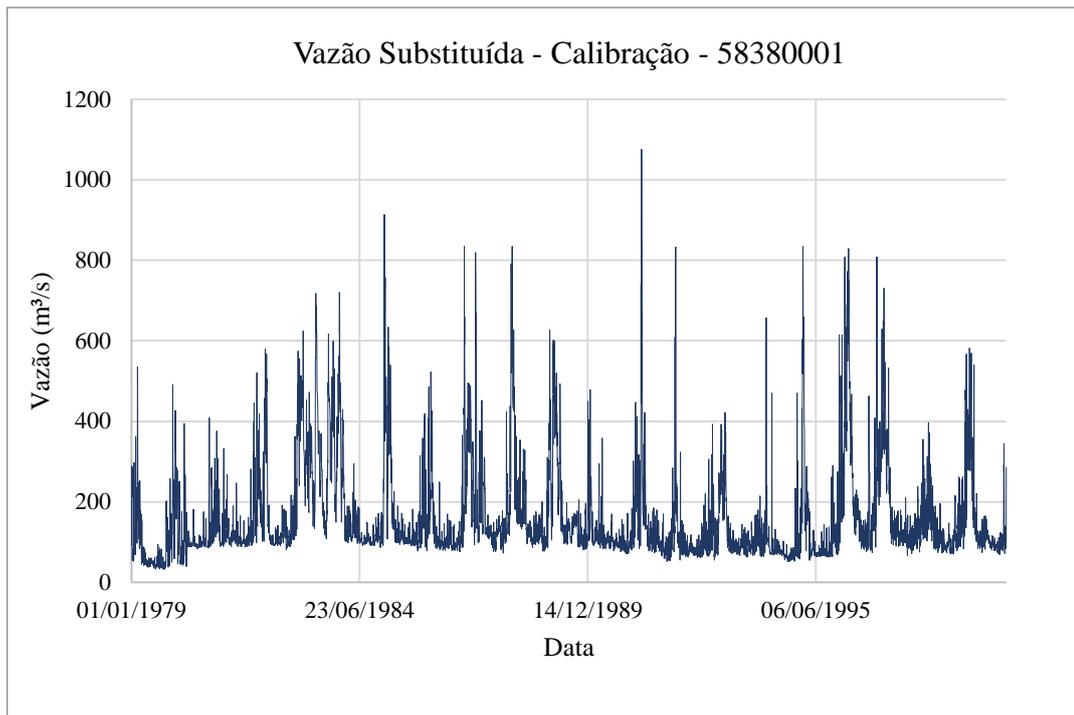


Figura 24 – Localização das UHE's e UEL's na parte alta da bacia do rio Paraíba do Sul.

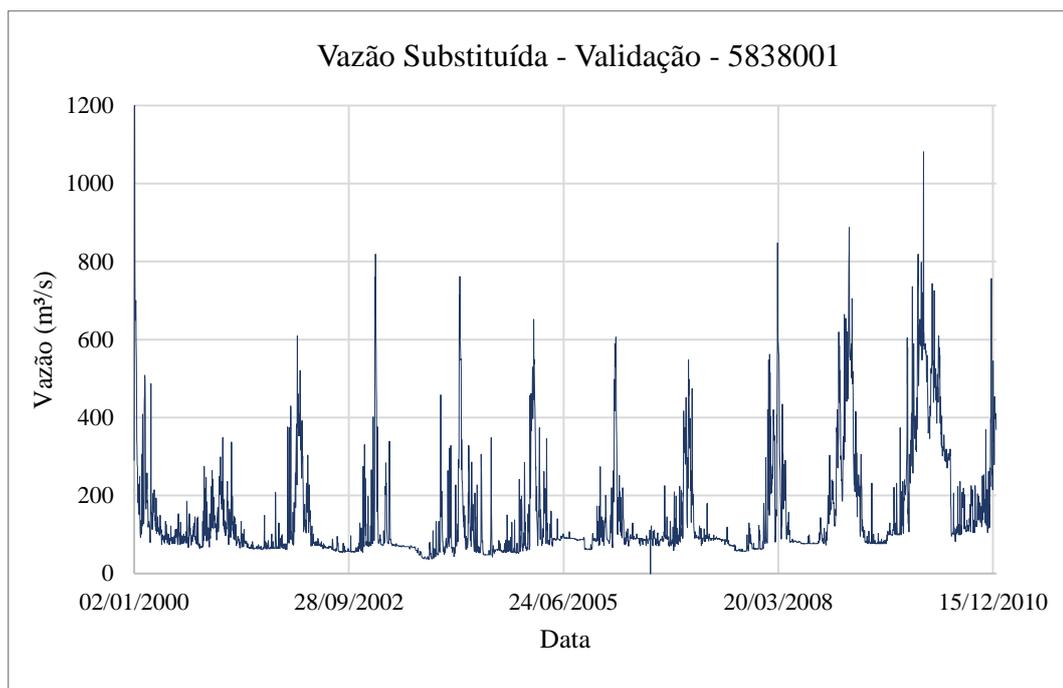
(FONTE: JORDÃO *et al.*, 2018).

A partir destas considerações optou-se por substituir as vazões simuladas no modelo hidrológico MGB-IPH pelas vazões observadas do posto fluviométrico Paraíba do Sul – RN (58380001) para representar a influência dos reservatórios na simulação hidrológica. A Figura 25 apresenta os hidrogramas de vazões substituídas, para os períodos de validação e calibração do modelo, e a Figura 26 a localização do ponto de substituição das vazões na bacia.

Após a constatação da grande influência dos reservatórios na região citada, buscou-se analisar outros postos fluviométricos para região a fim de considera-los para calibração e validação dos modelos. Porém, foi constatado que outros postos fluviométricos, com disponibilidade de dados nos períodos considerados, também sofrem grande influência dos reservatórios e apresentam o mesmo padrão de vazões observado no posto Paraíba do Sul - RN. Sendo assim, optou-se por não considerar estes postos na calibração e validação do modelo MGB-IPH. O modelo apresenta estudos de introdução de módulos de reservatório (FLEISCHMANN *et al.*, 2015), mas devido a melhor divisão dos esforços e o tempo de realização do trabalho foi decidido considerar para calibração e validação do modelo hidrológico somente a região a jusante do ponto de substituição de vazões, salientando que as predições de vazão na parte alta da bacia simuladas pelo modelo não serão então capazes de representar a influência dos grandes reservatórios da bacia.



*Hidrograma de vazões substituídas no período de calibração do modelo hidrológico – posto Paraíba do Sul – RN (58380001).*



*Hidrograma de vazões substituídas no período de validação do modelo hidrológico – posto Paraíba do Sul – RN (58380001).*

*Figura 25 – Hidrogramas de vazões substituídas do Posto Paraíba do Sul – RN (58380001).*

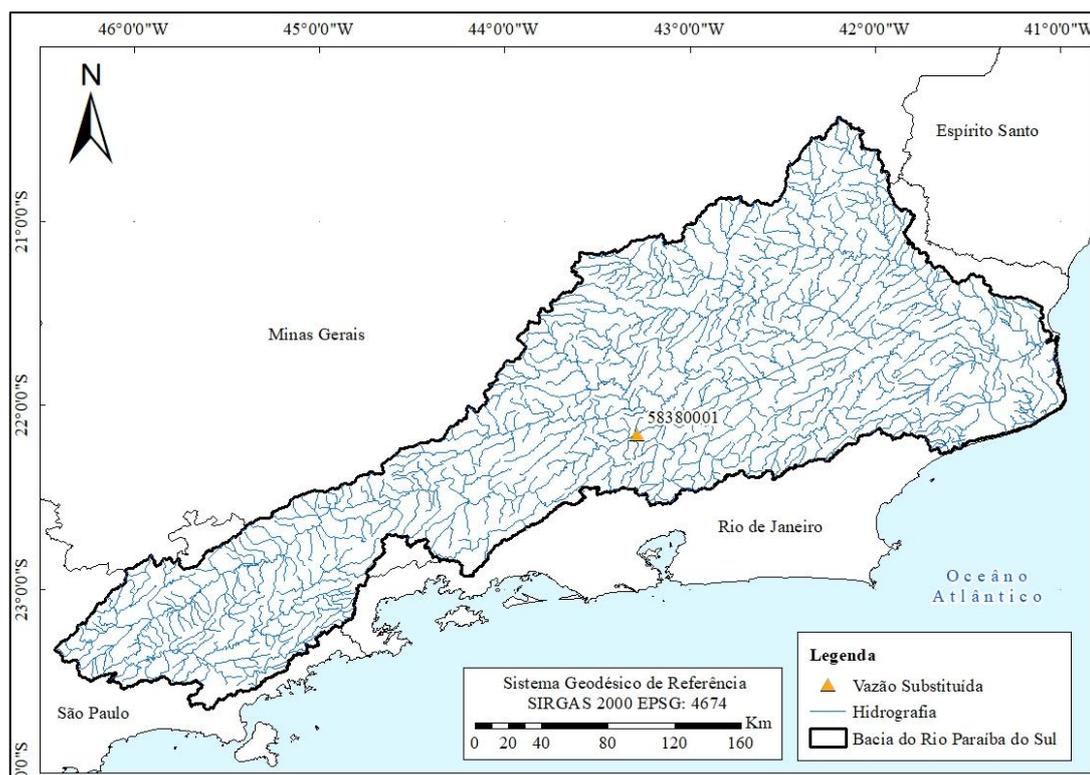


Figura 26 - Localização do posto fluviométrico cuja vazão observada foi substituída na modelagem hidrológica.

Após a consideração acerca da vazão a ser substituída na simulação, restaram ainda 31 postos fluviométricos que foram usados para calibração e validação do modelo MGB-IPH. A Tabela 6 apresenta os postos de medição de vazão considerados para calibração e validação do modelo hidrológico, demonstrando seus códigos, coordenadas, nomes, nomes do órgão operador, o nome do rio onde se encontram e a área de drenagem a montante.

Tabela 6 – Postos fluviométricos utilizados para calibração e validação do modelo MGB-IPH na bacia do Rio Paraíba do Sul.

CÓDIGO	LAT.	LONG.	NOME	OP.	ÁREA DRENAGEM (km <sup>2</sup> )	RIO
58220000	-22,692	-44,974	FAZENDA SANTA CLARA	CPRM	240	RIO BOCAINA
58405000	-22,332	-43,134	PEDRO DO RIO	CPRM	435	RIO PIABANHA
58420000	-22,200	-42,901	FAZENDA SOBRADINHO	CPRM	719	RIO PRETO
58480500	-21,778	-43,325	JUIZ DE FORA - JUSANTE	CPRM	969	RIO PARAÍBUNA
58520000	-21,966	-43,373	SOBRAJI	CPRM	3640	RIO PARAÍBUNA
58535000	-22,243	-44,264	ZELINDA	CPRM	418	RIO PRETO
58550001	-22,086	-43,818	RIO PRETO	CPRM	1800	RIO PRETO
58573000	-22,174	-43,731	PENTAGNA	CPRM	256	RIO BONITO
58585000	-22,086	-43,557	MANUEL DUARTE	CPRM	3110	RIO PRETO
58610000	-21,896	-43,041	ESTEVÃO PINTO	CPRM	783	RIO CAGADO
58630002	-22,035	-42,991	ANTA (ANTA G)	CPRM	32700	RIO PARAÍBA DO SUL
58645000	-22,046	-42,679	SUMIDOURO	CPRM	294	RIO PAQUEQUER
58735000	-21,307	-42,862	ASTOLFO DUTRA	CPRM	2350	RIO POMBA
58765001	-21,471	-42,830	USINA MAURÍCIO	CPRM	1770	RIO NOVO

CÓDIGO	LAT.	LONG.	NOME	OP.	ÁREA DRENAGEM (km <sup>2</sup> )	RIO
58770000	-21,389	-42,696	CATAGUASES	CPRM	5880	RIO POMBA
58795000	-21,627	-41,886	TRÊS IRMÃOS	CPRM	45300	RIO PARAÍBA DO SUL
58825000	-22,220	-42,571	PONTE ESTRADA DONA MARIANA	CPRM	234	RIO GRANDE
58827000	-22,157	-42,416	BOM JARDIM	CPRM	553	RIO GRANDE
58846000	-22,024	-42,134	MANUEL DE MORAIS	CPRM	1370	RIO GRANDE
58850000	-21,770	-41,938	PIMENTEL	CPRM	1810	RIO GRANDE
58857000	-21,952	-42,356	ALDEIA - RV	CPRM	313	RIO NEGRO
58870000	-21,729	-41,952	BARRA DO RIO NEGRO	CPRM	1120	RIO NEGRO
58874000	-21,643	-41,859	DOIS RIOS	CPRM	3120	RIO DOIS RIOS
58880001	-21,645	-41,752	SÃO FIDELIS	CPRM	48900	RIO PARAÍBA DO SUL
58916000	-20,772	-42,301	BICUIBA	CPRM	393	RIO GLÓRIA
58917000	-20,913	-42,349	JUSSARA	CPRM	744	RIO GLÓRIA
58920000	-21,149	-42,216	PATROCÍNIO DO MURIAÉ	CPRM	2660	RIO MURIAÉ
58930000	-20,740	-42,024	CARANGOLA	CPRM	773	RIO CARANGOLA
58940000	-21,208	-41,893	ITAPERUNA	CPRM	5800	RIO MURIAÉ
58960000	-21,487	-41,617	CARDOSO MOREIRA - RV	CPRM	7210	RIO MURIAÉ
58974000	-21,753	-41,300	CAMPOS - PONTE MUNICIPAL	CPRM	55700	RIO PARAÍBA DO SUL

Os dados referentes ao clima se expressam através das normais climatológicas obtidas das 56 estações meteorológicas do INMET próximas a bacia. 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 Definição dos Parâmetros Fixos

O Modelo MGB-IPH possui uma série de parâmetros que são definidos em diferentes etapas de sua aplicação para cada Unidade de Resposta Hidrológica. Alguns dos parâmetros são definidos de antemão, os chamados parâmetros fixos, enquanto que os parâmetros mais sensíveis do modelo precisam ser calibrados (BUARQUE, 2015). Os parâmetros fixos referem-se às características da vegetação, sendo: albedo, resistência superficial, altura da vegetação e o Índice de Área Foliar (IAF).

Os parâmetros fixos foram definidos para cada URH de acordo com indicações de literatura disponibilizadas pelo próprio modelo, informações encontradas no plano de bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul (AGEVAP, 2007; AGEVAP; 2014a) e também a partir de

conhecimentos obtidos durante o período de graduação acerca do assunto. os parâmetros fixos adotados para a bacia do rio Paraíba do Sul se encontram no Apêndice II.

#### 4.2.4 Calibração e Validação do modelo Hidrológico

O processo de calibração do modelo MGB-IPH concretizou-se de forma manual a partir da alteração dos parâmetros do solo para todas as sub-bacias geradas. Esses parâmetros são definidos como calibráveis no modelo por serem os parâmetros a partir dos 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 ( $b$ ). Outros parâmetros passíveis de serem calibrados no modelo não foram alterados, sendo então adotados valores padrões sugeridos pelo modelo, sendo: parâmetro 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 ( $WC$ ).

Os parâmetros foram inicialmente simulados a partir de valores médios, sugeridos pelo próprio modelo, como valores iguais para toda a bacia e comparados aos dados observados de vazões a partir de métricas de desempenho que serão melhores descritas no item 4.4. os valores forem então alterados manualmente, para cada sub-bacia, até que as métricas de desempenho tenham atingido valores satisfatórios ou não pudessem mais ser aprimorados. Os parâmetros calibrados do modelo hidrológico se encontram no Apêndice III, discretizados para todas as sub-bacias.

Foram realizadas ao todo em torno de 80 a 100 simulações para o período respectivo à calibração do modelo (1979 – 2000) e após ter sido encontrado um ponto de satisfação com os resultados foi simulado o período de validação dos resultados (2000 – 2010).

### 4.3 Preparação e calibração do modelo de sedimento

Uma vez calibrado e validado o modelo hidrológico dá-se início à preparação e calibração do modelo de sedimentos MGB-SED. Conforme apresentado por Buarque (2015) o

módulo de sedimentos também necessita de uma etapa de pré-processamento onde são definidos os dados a serem utilizados para as métricas de desempenho do modelo e a definição dos parâmetros iniciais da MUSLE. De especial interesse para este trabalho é a métrica de aquisição de dados oriundos de imagens de satélite no apoio à simulação hidrossedimentológica, sendo assim os itens que seguem descrevem todos os processos envolvidos na preparação e calibração do modelo de sedimentos.

#### **4.3.1 Extração da concentração de sedimentos em suspensão a partir de imagens de sensoriamento remoto**

A partir da rotina, descrita anteriormente, de aquisição de dados de sensoriamento remoto através da plataforma *Google Earth Engine* (GEE) foram extraídos dados respectivos à banda do vermelho de imagens dos satélites *Landsat 5* e *7*, sendo importante considerar que os dados do satélite *Landsat 8* não foram utilizados em virtude de que o seu período de início de disponibilização de dados, em 2013, acabou não sendo incorporado nos períodos de calibração e validação dos modelos.

De acordo com Ponzoni & Shimabukuro (2010) os sensores dos satélites podem sofrer interferências de alvos vizinhos do alvo observado devido a refrações na atmosfera de sua radiação emitida. Isto aplicado à análise do comportamento da água em rios através de sensoriamento remoto indica que quanto menor for a largura do rio, maior poderá ser a interferência das margens e do solo na intensidade da reflectância da água na banda do vermelho. Considerando a resolução espacial dos satélites *Landsat* (30 metros), buscou-se enquadrar os pontos de extração de dados em locais com o maior número de *pixels* ao seu redor que se encontram ainda na calha do rio.

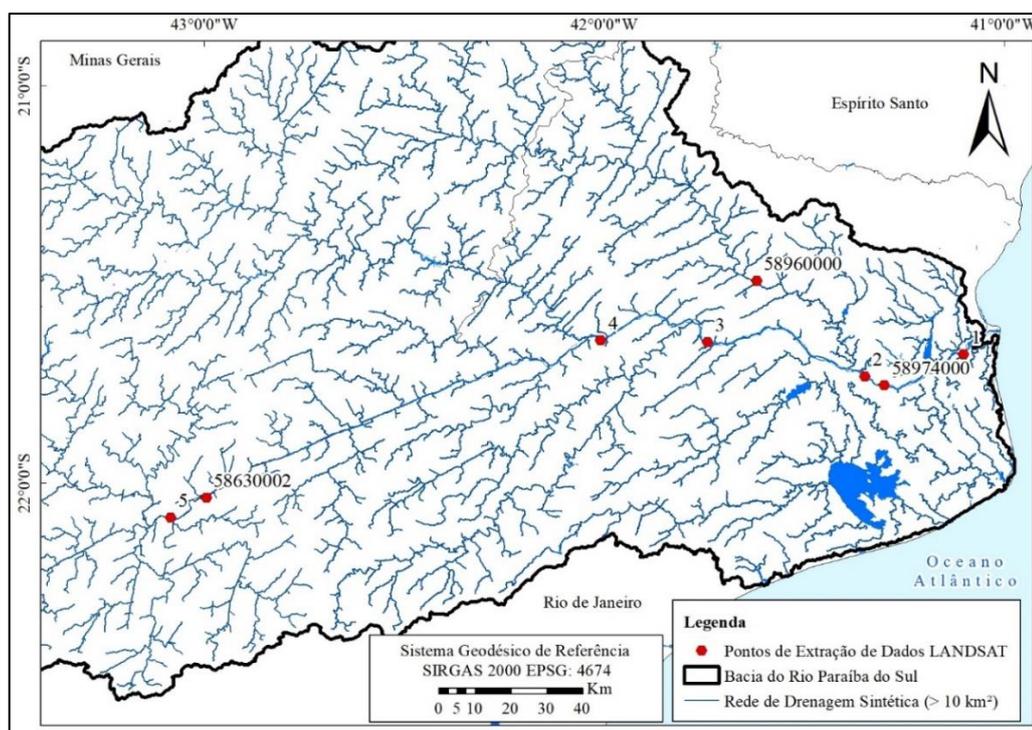
Foram definidos então 8 pontos virtuais de amostragem de acordo com a seguinte estratégia: locais respectivos a postos fluviométricos com medição de sedimentos e locais representativos das confluências entre o rio Paraíba do Sul e seus principais afluentes. Desta maneira será possível inferir a correlação dos dados simulados de sedimento com a reflectância espectral da banda do vermelho das imagens considerando o aporte de sedimentos ao rio Paraíba do sul de toda a bacia.

7 dos 8 pontos de amostragem se encontram em locais onde o rio apresenta uma largura consideravelmente maior do que a resolução espacial dos satélites, exceto o ponto referente ao

posto fluviométrico Cardoso Moreira (58960000), no rio Muriaé, onde a largura do rio é de aproximadamente 80 metros. Esse posto foi escolhido, não só para comparações referentes aos dados observados de sedimentos, mas também para verificar a influência de uma possível interferências das margens e do solo nos dados extraídos. A Tabela 7 apresenta uma descrição dos pontos de extração e dados definidos e a Figura 27 suas respectivas localizações na bacia. Os pontos exatos dos locais definidos foram colocados nos rios de maneira a evitar o máximo possível a presença de turbulência, corredeiras e bancos de areia. Também buscou-se enquadrar o ponto na região da calha do rio com o máximo de *pixels* vizinhos visivelmente inseridos dentro da calha dos rios.

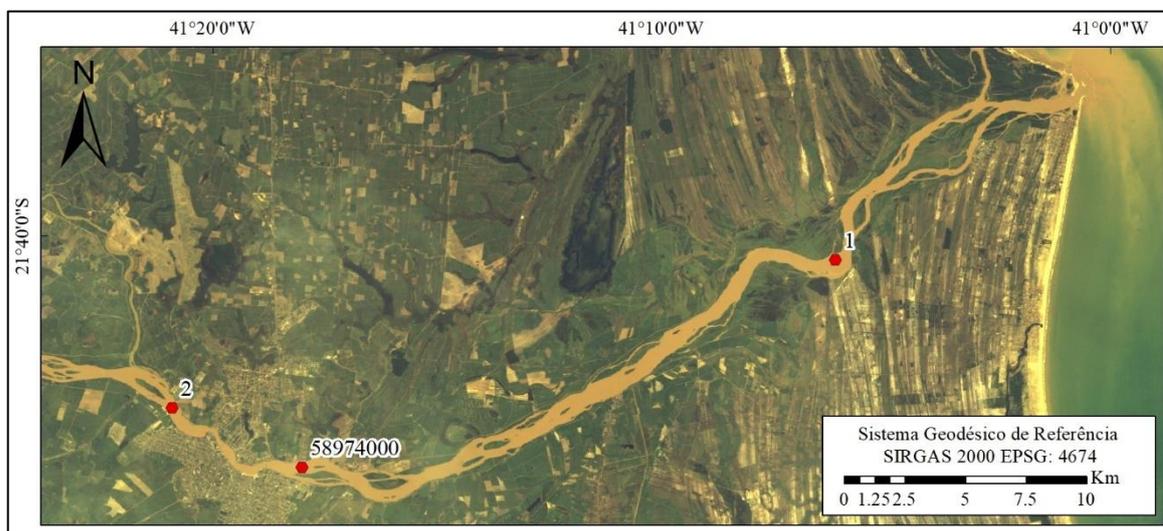
*Tabela 7 – Pontos virtuais definidos para extração de dados dos satélites Landsat.*

Código	Descrição	Largura (m)
58974000	Posto Campos – Ponte Municipal - 58974000 - Rio Paraíba do Sul	450
58630002	Posto Anta G - 58630002 - Rio Paraíba do Sul	180
58960000	Posto Cardoso Moreira - 58960000 - Rio Muriaé	80
P1	Ponto próximo ao encontro do Rio Paraíba do Sul com o Oceano	550
P3	Ponto representativo da Confluência do Rio Paraíba do Sul com o Rio Dois Rios	400
P2	Ponto representativo da Confluência do Rio Paraíba do Sul com o Rio Muriaé	470
P4	Ponto representativo da Confluência do Rio Paraíba do Sul com o Rio Pomba	180
P5	Ponto representativo da Confluência do Rio Paraíba do Sul com o Rio Preto	440

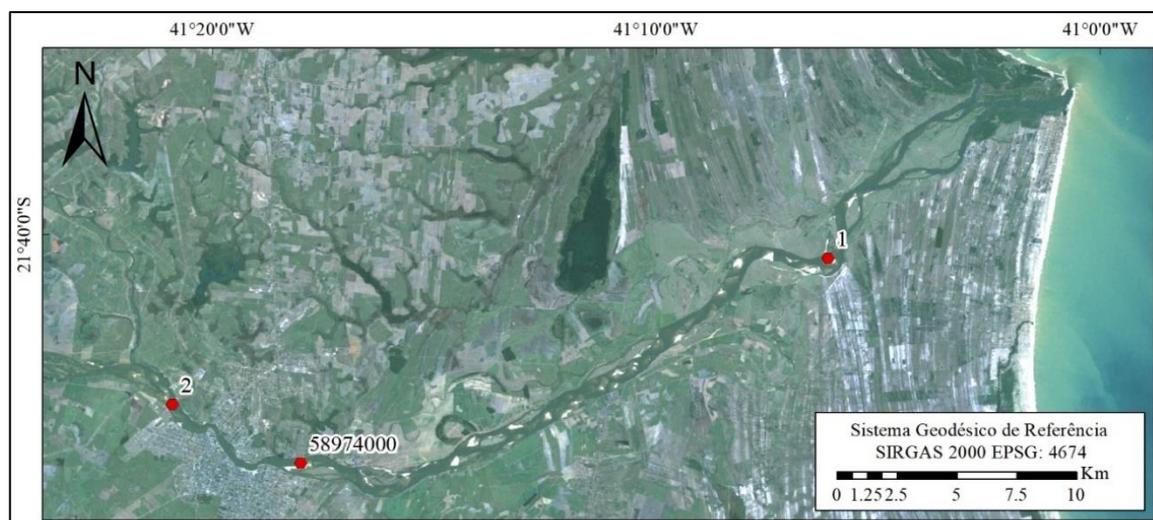


*Figura 27 – Localização dos pontos de extração de dados de sensoriamento remoto na bacia do Rio Paraíba do Sul.*

A Figura 28 abaixo apresenta uma caracterização visual da diferença entre duas imagens com diferentes reflectâncias espectrais da superfície na banda do vermelho. Ao analisar a imagem é nítida a presença de sedimentos em suspensão no rio Paraíba do Sul. na figura é possível reconhecer a localização de 3 dos pontos virtuais selecionados para extração de dados.



*Imagem em composição da luz visível (3R2G1B) do satélite Landsat 5 próxima ao exutório do rio Paraíba do Sul no dia 10/03/1986 – registro de alta reflectância na banda do vermelho e alta concentração de sedimentos.*



*Imagem em composição da luz visível (3R2G1B) do satélite Landsat 5 próxima ao exutório do rio Paraíba do Sul no dia 14/04/1987 – registro de baixa reflectância na banda do vermelho e baixa concentração de sedimentos.*

*Figura 28 – Comparativo entre duas imagens de satélite próximas ao exutório do rio Paraíba do Sul com visível diferença na concentração de sedimentos em suspensão.*

### 4.3.2 Definição dos Dados de Sedimento

Ao analisar os dados de sedimentos obtidos, através do pedido via e-mail junto à Agência Nacional de Águas (ANA), percebeu-se que grande parte dos postos fluviométricos

com medições de sedimentos apresentavam poucas medições de sedimento, sendo em maioria postos com menos de 10 medições da concentração de sólidos em suspensão ao longo de todo o período de registros do posto. Alguns postos também estavam localizados na região da bacia que sofre grande influência de reservatórios e transposições. Sendo assim optou-se por fazer uso apenas dos postos que apresentavam maior quantidade de medições e que não se encontravam a montante do ponto de substituição de vazões do modelo hidrológico.

Por fim, resultaram seis postos para serem utilizados na calibração e validação do modelo de sedimentos, dentre eles, cinco utilizados na calibração do modelo MGB-IPH. Mesmo sendo poucos, os postos se dispõem na bacia de maneira bem espalhada, possuem diferentes áreas de drenagem e representam a possibilidade de avaliar a dinâmica de sedimentos de 4 rios principais da bacia.

O posto Anta G (58630002), devido à sua disponibilidade de dados, foi considerado apenas na calibração do modelo de sedimentos, assim como o posto Santo Antônio de Pádula II foi considerando apenas no período de validação do modelo. A Tabela 8 apresenta os postos sedimentométricos considerados para calibração e validação do modelo de sedimentos, demonstrando seus códigos, coordenadas, nomes, nomes do órgão operador, o nome do rio onde se encontram e a área de drenagem a montante, e a Figura 29 apresenta a localização dos pontos na bacia.

*Tabela 8 - Postos sedimentométricos utilizados para calibração e validação do modelo MGB-IPH na bacia do Rio Paraíba do Sul.*

CÓDIGO	LAT.	LONG.	NOME	OP.	ÁREA DRENAGEM (KM <sup>2</sup> )	RIO
58480500	-21,778	-43,325	JUIZ DE FORA - JUSANTE	CPRM	969	RIO PARAÍBUNA
58630002*	-22,035	-42,990	ANTA (ANTA G)	CPRM	32700	RIO PARAÍBA DO SUL
58790002**	-21,542	-42,180	SANTO ANTÔNIO DE PÁDUA II	CPRM	8210	RIO POMBA
58770000	-21,389	-42,696	CATAGUASES	CPRM	5880	RIO POMBA
58960000	-21,487	-41,616	CARDOSO MOREIRA - RV	CPRM	7210	RIO MURIAÉ
58974000	-21,753	-41,300	CAMPOS - PONTE MUNICIPAL	CPRM	55700	RIO PARAÍBA DO SUL

\* Posto considerado apenas na calibração do modelo MGB-SED

\*\* Posto considerado apenas na validação do Modelo MGB-SED.

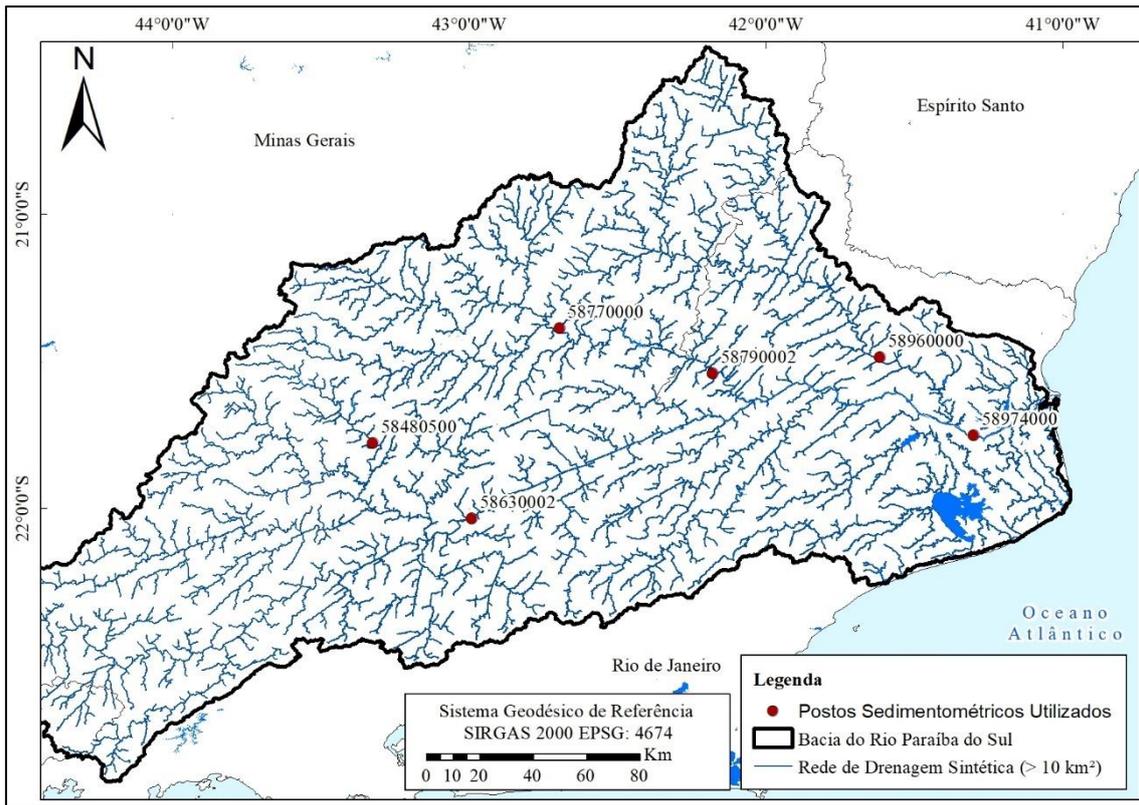


Figura 29 - Localização dos postos sedimentométricos utilizados para calibração e validação do modelo de sedimentos MGB-IPH.

#### 4.3.3 Definição dos parâmetros Iniciais da MUSLE

Além dos dados medidos de concentração de sedimentos em suspensão, para as simulações do modelo MGB-SED, são necessários dados relativos aos parâmetros da MUSLE (Equação 22). O fator de comprimento e declive  $LS$ , é determinado em uma etapa de pré-processamento de dados, na qual é calculado para cada *pixel* do MDE utilizando uma rotina computacional específica. Os parâmetros  $Dsup$  e  $qpico$  são obtidos através da modelagem hidrológica e  $Apm$  é a área de cada *pixel* do MDE. Sendo assim, o modelo possibilita alterações nos parâmetros  $P$  (práticas conservacionistas),  $FG$  (fator de fragmentos grosseiros),  $C$  (fator de usos e cobertura do solo) e  $K$  (fator de erodibilidade do solo).

$$SED_{i,j}^k = \alpha \cdot (Dsup_{i,j}^k \cdot qpico_{i,j}^k \cdot Apm_{i,j}^k)^\beta \cdot K_j \cdot C_j \cdot P_j \cdot LS_{i,j}^k \cdot FG_j$$

Equação 22

Os parâmetros  $P$  e  $FG$  foram mantidos como valores unitários de acordo como apresentado na proposição do modelo de Buarque (2015). Dessa maneira, foram estimados valores iniciais apenas dos parâmetros  $K$  e  $C$  da MUSLE.

#### 4.3.3.1 Fator de Erodibilidade do Solo (K)

O fator de erodibilidade do solo é calculado através da Equação 11, na qual são considerados as porcentagens de argila, silte e areia para cada tipo de solo. Para estimar as porcentagens fez-se o uso do mapa de tipos de solo da FAO (2007), correlacionado com os usos do solo da EMBRAPA (2006) e de acordo com as proposições em Fan *et al.* (2015) que correlacionam os tipos de solo da EMBRAPA com cada Unidade de Resposta Hidrológica do mapa da América Latina. O mapa de tipos de solo da FAO apresenta estimativas das porcentagens de argila, silte, areia e carbono orgânico que serviram de base para gerar estimativas das porcentagens para cada sub-bacia de calibração, de acordo com a Tabela 9.

*Tabela 9 – Tipos de solo FAO presentes na bacia do Rio Paraíba Sul correlacionados com os solos da EMBRAPA e as Unidades de Resposta Hidrológicas utilizadas na modelagem, e as porcentagens de areia, silte, argila e carbono orgânico de cada solo.*

Solo FAO	Solo EMBRAPA	URH	% Areia	% Silte	% Argila	% CO
Orthic Acrisols	Argissolos	Solos Profundos	53,6	15,8	31	2,25
Orthic Ferralsols	Latossolos	Solos Profundos	28,7	18,4	53	1,92
Xanthic Ferralsols	Latossolos	Solos Profundos	52,6	7,8	40	1,23
Eutric Nitisols	Nitossolos	Solos Profundos	68,4	10,5	21	0,6
Dystric Gleysols	Gleissolos	Várzea	18,9	21,8	59	2,92
Dystric Cambisols	Cambissolos	Solos Rasos	32,7	30,3	37	3,28
Chromic Luvisols	Luvissolos	Solos Rasos	64,3	12,2	24	0,63
Ferric Luvisols	Luvissolos	Solos Rasos	74,6	9,6	16	0,39

Para estimar as porcentagens de areia, silte, argila e carbono orgânico para cada URH, em cada sub-bacia, foi cruzado o mapa de sub-bacias com o mapa da FAO através de ferramentas de geoprocessamento, identificando assim quais solos se encontravam dentro de cada sub-bacia. Como cada sub-bacia carrega informações para todas as possibilidades de Unidade de Respostas Hidrológicas, analisou-se caso a caso para estimar as porcentagens, por exemplo: quando havia mais de um tipo de solo FAO com correspondência de solo profundo em uma sub-bacia utilizava-se a média das porcentagens de areia, silte, argila e carbono orgânico destes solos para estimar as frações presentes na sub-bacia, valendo-se o mesmo para solos rasos. Quando não havia correspondência alguma de solo profundo na sub-bacia utilizou-se a média de todos os solos que correspondem a solos profundos para estimar as porcentagens iniciais para cada URH da sub-bacia, também valendo-se o mesmo para os solos rasos. Somente para a URH de várzea utilizou-se os mesmos valores das frações por haver somente uma correspondência com os solos FAO.

#### 4.3.3.2 Fator de Uso e Cobertura do Solo (C)

Os valores iniciais do fator C da MUSLE, para cada Unidade de Resposta Hidrológica, foram estimados a partir de uma revisão bibliográfica na qual foram encontrando, através de diversos estudos e publicações, valores de referência para as coberturas do solo de floresta, agricultura, campo e áreas semi-impermeáveis. Para a URH de várzea não foram encontrados valores de referência. As estimativas iniciais do fator C foram estipuladas de acordo com os valores mais aparentes na literatura, de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10 - Referências de valores do fator C da MUSLE.

Tipo de Cobertura do Solo	Fator C	Referência
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> ; 0,003-0,048 <sup>5</sup> ; 0,0001 – 0,003 <sup>9</sup> ); Floresta com Vegetação Rasteira (0,002) <sup>8</sup> ; Floresta sem Vegetação Rasteira (0,003) <sup>8</sup> ; Floresta Média (0,001) <sup>4</sup> ,	
Agricultura	Agricultura Irrigada (0,018) <sup>1</sup> ; Agricultura Sequeiro (0,018) <sup>1</sup> ; Colheita (0,128 <sup>6</sup> ; 0,01 <sup>7</sup> ; 0,255 - 0,525 <sup>5</sup> ); Soja (0,2 - 0,5) <sup>4</sup> ; Arroz (0,1 - 0,2) <sup>4</sup> ; Café (0,1 - 0,3) <sup>4</sup> ; Agricultura em Estágio Inicial (0,2) <sup>8</sup> ; Agricultura em Estágio Final (0,05) <sup>8</sup> ; Culturas (0,11) <sup>9</sup> ; Cana de Açúcar (0,15 – 0,001) <sup>9</sup> Milho (0,3 – 0,01) <sup>9</sup> ,	<sup>1</sup> Farinasso <i>et al.</i> (2006); <sup>2</sup> Dymond (2010); <sup>3</sup> David (1988); <sup>4</sup> Morgan (2005); <sup>5</sup> Land Development Department (2002);
Campo	Cerrado (0,042) <sup>1</sup> ; Pasto (0,01 <sup>2</sup> ; 0,1 <sup>4</sup> ; 0,4 - 0,004 <sup>9</sup> ); Grama (0,007) <sup>8</sup> ; Pastagens (0,022) <sup>9</sup> ; Campos Limpos (0,038) <sup>9</sup> ,	<sup>6</sup> Fernandez <i>et al.</i> (2003); <sup>7</sup> Dumas & Fossey (2009);
Várzea	Não foram encontrados valores na literatura para áreas de várzea,	<sup>8</sup> Kuok <i>et al.</i> (2013); <sup>9</sup> Branco (1998)
Áreas Semi-Impermeáveis	Áreas Urbanas (0,0001 <sup>1</sup> ; 0,2 <sup>3</sup> ; 0,03 <sup>6</sup> ; 0 <sup>7</sup> ); Assentamento (0,25) <sup>8</sup> ,	

#### 4.3.4 Introdução dos Parâmetros $\alpha$ e $\beta$ no Modelo MGB-SED

O modelo de sedimentos MGB-SED em sua proposição inicial (BUARQUE, 2015) apresenta os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  da equação de MUSLE (11,8 e 0,56, respectivamente). Para o estudo em questão, buscou-se fazer alterações no código original do modelo e a fim de tornar estes parâmetros variáveis na simulação hidrossedimentológica e testar se suas variações fornecem maior auxílio na calibração do modelo. Os parâmetros foram inseridos de forma a serem variados para a bacia como um todo, não sendo permitido discretizá-los e calibrá-los para as sub-bacias discretizadas.

O parâmetro  $\alpha$  age na equação aumentando ou reduzindo a produção de sedimentos na bacia de forma linear, já o parâmetro  $\beta$ , como entra na equação de forma exponencial permite gerar maiores variações nos sedimentogramas reduzindo e aumentando os picos da concentração de sedimentos simulada.

#### 4.3.5 Calibração e Validação do Modelo de Sedimentos

O processo de calibração do modelo MGB-SED, concretizou-se de forma que o modelo hidrológico, manualmente a partir da alteração dos parâmetros da MUSLE. O fator C foi alterado de forma individual para cada sub-bacia e as porcentagens de silte, argila e areia foram variadas somando e diminuindo valores das porcentagens iniciais para todas as sub-bacias, alterando assim o fator K da equação. Após ser realizado o melhor ajuste dos parâmetros anteriores foram realizadas variações nos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  a fim de avaliar se estes, ao serem alterados apresentavam melhorias no modelo. Para as sub-bacias que não apresentaram postos com medição de sedimentos para sua calibração foram adotados valores intermediários das sub-bacias calibradas mais próximas.

Foram realizadas ao todo em torno de 100 a 150 simulações para o período respectivo à calibração do modelo (1979 – 2000) e após ter sido encontrado um ponto de satisfação com os resultados foi simulado o período de validação dos resultados (2000 – 2010).

É necessário salientar que os sedimentogramas disponíveis para cada posto não apresentam uma densidade de dados suficiente para caracterizar a dinâmica hidrossedimentológica dos rios da bacia. Sendo assim na calibração e validação do modelo de sedimentos também se contou com a análise visual dos dados, buscando entender se o

modelo é capaz de representar a amplitude de dados observados disponíveis e se as simulações realizadas entre os dados apresentam coerência.

#### 4.4 Verificação dos Resultados

A partir do objetivo de verificar a acurácia dos modelos simulados, nas etapas de calibração e validação, foram analisadas métricas de desempenho específicas e com variações para cada modelo. Para o modelo hidrológico MGB-IPH foi analisado o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NASH), o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe aplicado ao logaritmo (NASHLog) e o erro de Volume ( $\Delta V$ ). Esses índices são calculados diretamente pelo modelo hidrológico, não sendo necessário manipular os dados para analisar os resultados. Diferente do modelo hidrológico, o modelo de sedimentos MGB-SED não calcula automaticamente nenhuma métrica de desempenho, sendo assim foi necessário elaborar planilhas no Excel que foram construídas para calcular as métricas de forma automática a partir da inserção dos dados gerados pelo modelo. As métricas de desempenho para o modelo de sedimentos foram estipuladas de acordo com as indicações de Moriasi *et al.*, (2007) onde foram calculados NASH,  $\Delta V$ , assim como no modelo hidrológico e o índice de correlação de Pearson ( $r$ ). Os itens abaixo se destinam a descrever as métricas de desempenho citadas e os intervalos adotados para inferir quão satisfatórias foram as simulações comparadas aos dados medidos.

##### 4.4.1 Métricas de Desempenho Utilizadas

###### 4.4.1.1 Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NASH)

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

$$\text{NASH} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}} - Y_i^{\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}} - \bar{Y}_i^{\text{obs}})^2}$$

*Equação 23*

Na qual NASH o coeficiente de Nash-Sutcliffe [adimensional];  $n$  é o número de dados observados e simulados;  $Y_i^{obs}$  é o valor observado;  $Y_i^{sim}$  é o valor simulado e  $\overline{Y_i^{obs}}$  é a média dos valores observados.

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).

#### 4.4.1.2 Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe Aplicado ao Logaritmo (NASHLog)

Segundo Paiva (2009), em muitos casos, devido à diferença na ordem de grandeza das vazões máximas e mínimas, a estatística de NASH não revela erros significativos nas vazões mínimas, assim a fim de avaliar o desempenho da simulação em situações de estiagem utiliza-se o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe do logaritmo das vazões.

$$NASH_{log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log Y_i^{obs} - \log Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (\log Y_i^{obs} - \overline{\log Y_i^{obs}})^2}$$

*Equação 24*

Na qual  $NASH_{log}$  o coeficiente do logaritmo de Nash-Sutcliffe [adimensional];  $n$  é o número de dados observados e simulados;  $\log Y_i^{obs}$  é o logaritmo do valor observado;  $\log Y_i^{sim}$  é o logaritmo do valor simulado; e  $\overline{\log Y_i^{obs}}$  é a média do logaritmo dos valores observados.

Assim como o coeficiente de NASH, o NASHLog também varia de  $-\infty$  a 1 e quanto mais próximo do valor 1 melhores são as previsões do modelo.

#### 4.4.1.3 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. Por exemplo, um erro de volume de -10% indica que o modelo gera ao longo do período de simulação uma vazão média 10% inferior à vazão observada. Idealmente os erros de volume devem se manter em uma faixa de -

10 a +10%, considerada razoável em função das incertezas dos próprios dados medidos (SILVEIRA, 2015).

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

*Equação 25*

Na qual  $\Delta V$  é o erro de volume [%];  $n$  é o número de dados observados e simulados [adimensional];  $Y_i^{obs}$  é o valor observado e  $Y_i^{sim}$  é o valor simulado.

#### 4.4.1.4 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).

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

*Equação 26*

Na qual  $r$  é o índice de correlação de Pearson [adimensional];  $x$  e  $y$  são os valores das amostras;  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são as médias das amostras.

#### 4.4.2 Faixas de Qualidade das Métricas de Desempenho

O trabalho confeccionado por Moriasi *et al.* (2007) se propôs a avaliar os intervalos de valores das métricas de eficiência e estabelecer diretrizes de classificação do desempenho de diferentes modelos em realizar predições através da definição de faixas para os diferentes índices. O estudo elabora faixas indicativas de valores satisfatórios e insatisfatórios para simulações de passo de tempo mensal. Com relação ao modelo hidrológico foram adotadas as faixas de valores mensais propostas, mesmo sendo simulado em escala diária, devido ao conhecimento de que o modelo MGB-IPH apresenta bons resultados nessa escala de análise.

Para o caso do modelo de sedimentos, devido à maiores dificuldades de realização de modelagem hidrossedimentológica, as faixas de classificação propostas por Moriasi *et al.* (2007) foram modificadas para valores um pouco menores do que os citados no estudo em função da simulação ocorrer também em escala diária. A Tabela 11 apresenta as faixas para as quais as simulações dos dois modelos foram consideradas, muito boas, boas, satisfatórias e insatisfatórias, de acordo com as métricas de desempenho empregadas para cada modelo.

*Tabela 11 - Faixas de Avaliação Adotadas para os Modelos Hidrológico e de Sedimentos.*

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

(FONTE: Adaptado de MORIASI *et al.*, 2007).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este item se destina apresentar os principais resultados obtidos através dos modelos MGB-IPH e MGB-SED para a bacia do rio Paraíba do Sul, contanto com especial detalhamento dos resultados obtidos através da análise da hidrossedimentologia da bacia através de imagens de satélite.

### 5.1 Modelo Hidrológico

A seguir são apresentados os principais resultados gerados através do modelo hidrológico contando com a apresentação das métricas de desempenho obtidas, para os períodos de calibração e validação, os hidrogramas observados e simulados para os postos que foram selecionados para calibrar e validar o modelo de sedimentos. Ao fim, há um comparativo entre as diferenças nas métricas de desempenho para os dois períodos simulados.

#### 5.1.1 Resultados da Calibração

Nos próximos itens são descritos e apresentados os resultados referentes às vazões simuladas para o período de calibração do modelo MBG-IPH, estipulado entre 01/01/1979 e 01/01/2000.

##### 5.1.1.1 Métricas de Desempenho

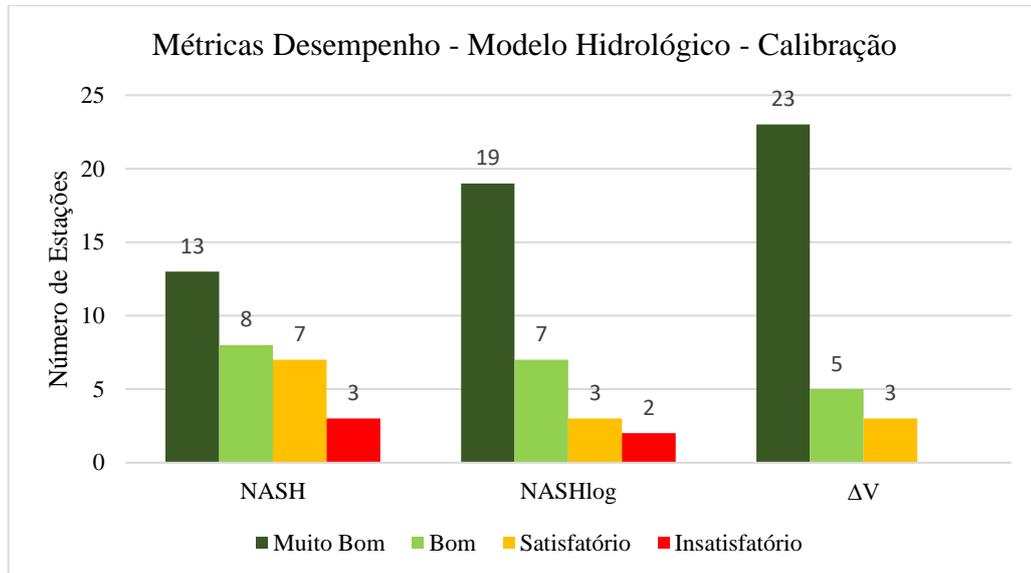
A Tabela 12 apresenta os postos fluviométricos utilizados na calibração do modelo, seu código e rio e as métricas de desempenho de Nash-Sutcliffe, logaritmo de Nash-Sutcliffe e erro de volume. Os resultados do modelo também foram representados em mapas contendo a sua localização espacial na bacia em faixas de cores referentes aos intervalos de classificação dos resultados em muito bons, bons, satisfatórios e insatisfatórios descritos anteriormente. Os postos utilizados na calibração do modelo de sedimentos se encontram grifados na tabela.

Tabela 12 – Métricas de desempenho para o período de calibração do modelo Hidrológico MGB-IPH.

CÓDIGO	RIO	NASH	NASHlog	$\Delta V$
58220000	RIO BOCAINA	0,316	0,448	-0,985
58405000	RIO PIABANHA	0,664	0,737	13,851
58420000	RIO PRETO	0,403	0,67	23,118
<b>58480500</b>	<b>RIO PARAÍBUNA</b>	<b>0,604</b>	<b>0,444</b>	<b>-9,256</b>
58520000	RIO PARAÍBUNA	0,865	0,878	-6,461
58535000	RIO PRETO	0,71	0,836	-11,77
58550001	RIO PRETO	0,845	0,912	-5,078
58573000	RIO BONITO	0,528	0,643	-3,539
58585000	RIO PRETO	0,856	0,917	-6,246
58610000	RIO CAGADO	0,699	0,754	-1,073
<b>58630002</b>	<b>RIO PARAÍBA DO SUL</b>	<b>0,921</b>	<b>0,938</b>	<b>-1,186</b>
58645000	RIO PAQUEQUER	0,467	0,591	-4,363
58735000	RIO POMBA	0,826	0,835	-4,524
58765001	RIO NOVO	0,805	0,54	-7,665
<b>58770000</b>	<b>RIO POMBA</b>	<b>0,866</b>	<b>0,867</b>	<b>4,989</b>
58795000	RIO PARAÍBA DO SUL	0,731	0,826	3,35
58825000	RIO GRANDE	0,612	0,767	7,04
58827000	RIO GRANDE	0,69	0,774	8,921
58846000	RIO GRANDE	0,795	0,813	-4,647
58850000	RIO GRANDE	0,782	0,83	3,527
58857000	RIO NEGRO	0,721	0,714	-11,37
58870000	RIO NEGRO	0,751	0,789	1,351
58874000	RIO DOIS RIOS	0,771	0,854	1,145
58880001	RIO PARAÍBA DO SUL	0,753	0,836	-0,097
58916000	RIO GLÓRIA	0,632	0,739	-6,479
58917000	RIO GLÓRIA	0,7	0,782	-6,44
58920000	RIO MURIAÉ	0,644	0,665	21,291
58930000	RIO CARANGOLA	0,66	0,745	-12,973
58940000	RIO MURIAÉ	0,528	0,709	21,283
<b>58960000</b>	<b>RIO MURIAÉ</b>	<b>0,646</b>	<b>0,811</b>	<b>10,111</b>
<b>58974000</b>	<b>RIO PARAÍBA DO SUL</b>	<b>0,77</b>	<b>0,807</b>	<b>0,14</b>
	Média dos Valores	0,696	0,757	7,234*
*Baseado em valores absolutos	Valor Máximo	0,921	0,938	23,118*
	Valor Mínimo	0,316	0,444	0,094*
	Desvio Padrão	0,140	0,124	6,166*

A Figura 30 apresenta um histograma de frequência que descreve a quantidade de estações com resultados enquadrados, em cada classe de performance do modelo, para as diferentes métricas utilizadas. Ao analisar os dados e a figura é possível perceber que a calibração do modelo hidrológico obteve resultados muito satisfatório apresentando uma

grande quantidade de postos enquadrados como muito bons para todas as métricas e resultados insatisfatórios inferiores a 10% dos casos.



*Figura 30 - Histograma de frequência da quantidade de estações para cada classe de performance de cada métrica de desempenho do período de calibração do modelo hidrológico MGB-IPH.*

A Figura 31 apresenta o mapa de valores de Nash-Sutcliffe obtidos para os postos da bacia. Percebeu-se um desempenho elevado em geral no período de calibração considerando que mais de 90% dos postos na bacia apresentam valores de NASH acima de 0,5, sendo a média dos valores igual a 0,69. todos os postos do rio Paraíba do Sul apresentaram valores superiores a 0,7, os postos com medições de sedimentos apresentaram valores satisfatórios e muito bons e somente 3 postos com pequenas áreas de drenagem apresentaram valores insatisfatórios.

A Figura 32 apresenta o mapa de valores de Nash-Sutcliffe obtidos para os postos da bacia. Analisando os dados, e a figura, percebeu-se que o desempenho do modelo para os valores de NASHlog foram ainda melhores do que os de NASH, indicando que o modelo foi capaz de representar as vazões de estiagem da bacia de forma muito precisa. Mais de 60% dos postos apresentaram valores considerados muito bons e apenas dois postos apresentaram valores insatisfatórios sendo um deles o posto sedimentométrico Justo de Fora – Jusante (58480500), no rio Paraíba, onde não foi possível melhor a calibração para as vazões de base devido a desencontros em os dados simulados e observados que não foram passíveis de melhores ajustes.

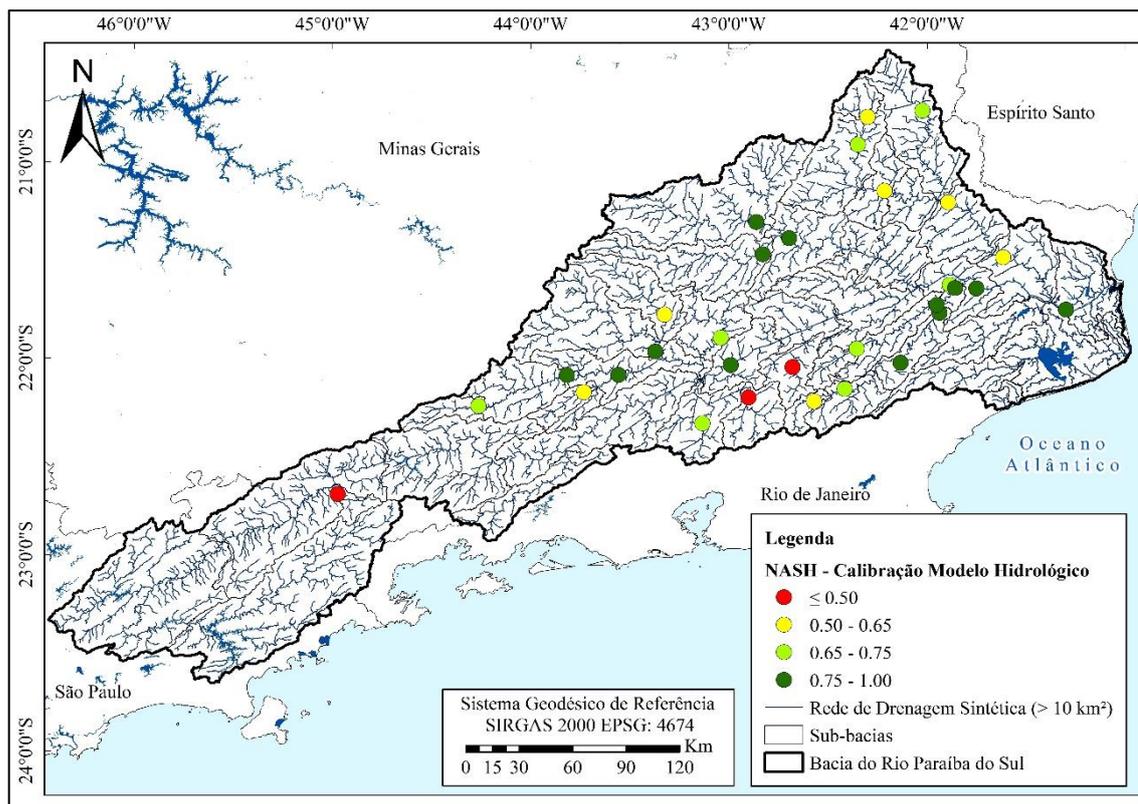


Figura 31 - Espacialização dos resultados de Nash-Sutcliffe do modelo hidrológico MGB-IPH para o período de calibração.

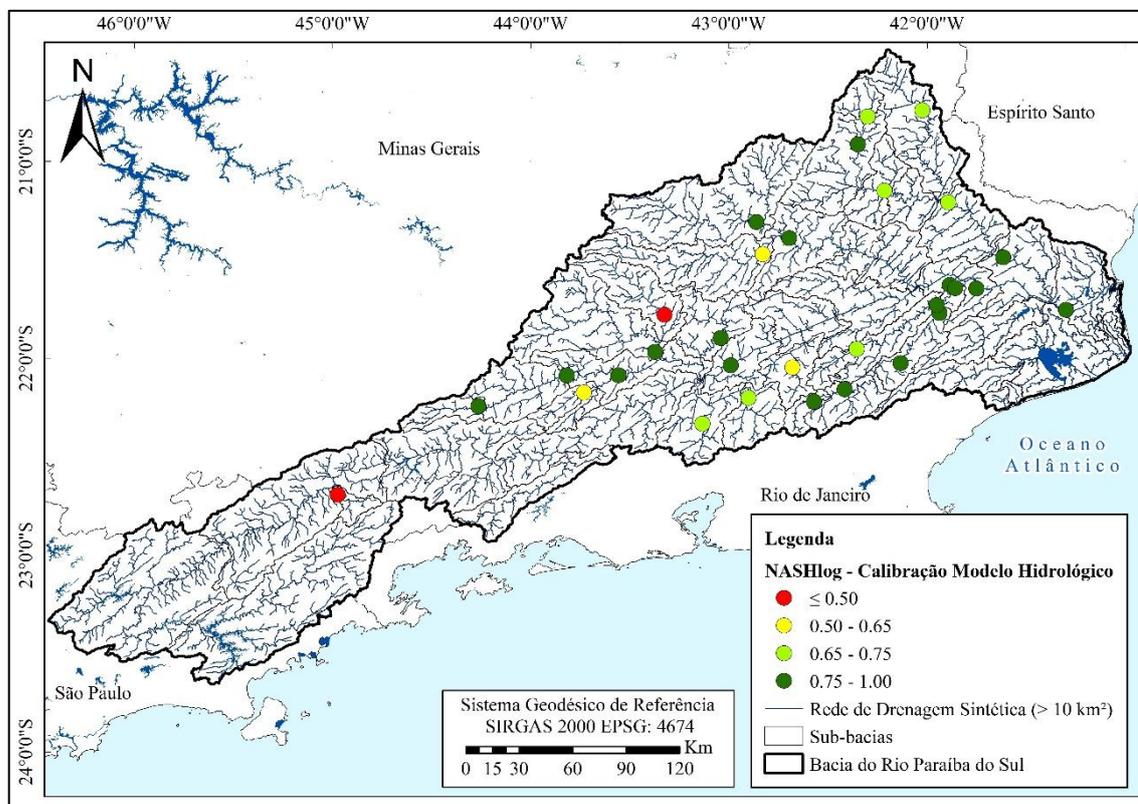


Figura 32 - Espacialização dos resultados do logaritmo de Nash-Sutcliffe do modelo hidrológico MGB-IPH para o período de calibração.

A Figura 33 apresenta o mapa dos valores para o erro de volume onde é possível notar que os resultados obtidos são ainda melhores do que os valores de NASHLog, sendo mais de 74% dos postos com métricas consideradas muito boas e nenhum o postou apresentou valor insatisfatório. Todo os postos com medições de sedimentos foram enquadrados como muito bons. Conclui-se quem em linhas gerais o modelo não apresentou nenhuma tendência de subestimar ou superestimar as vazões simuladas.

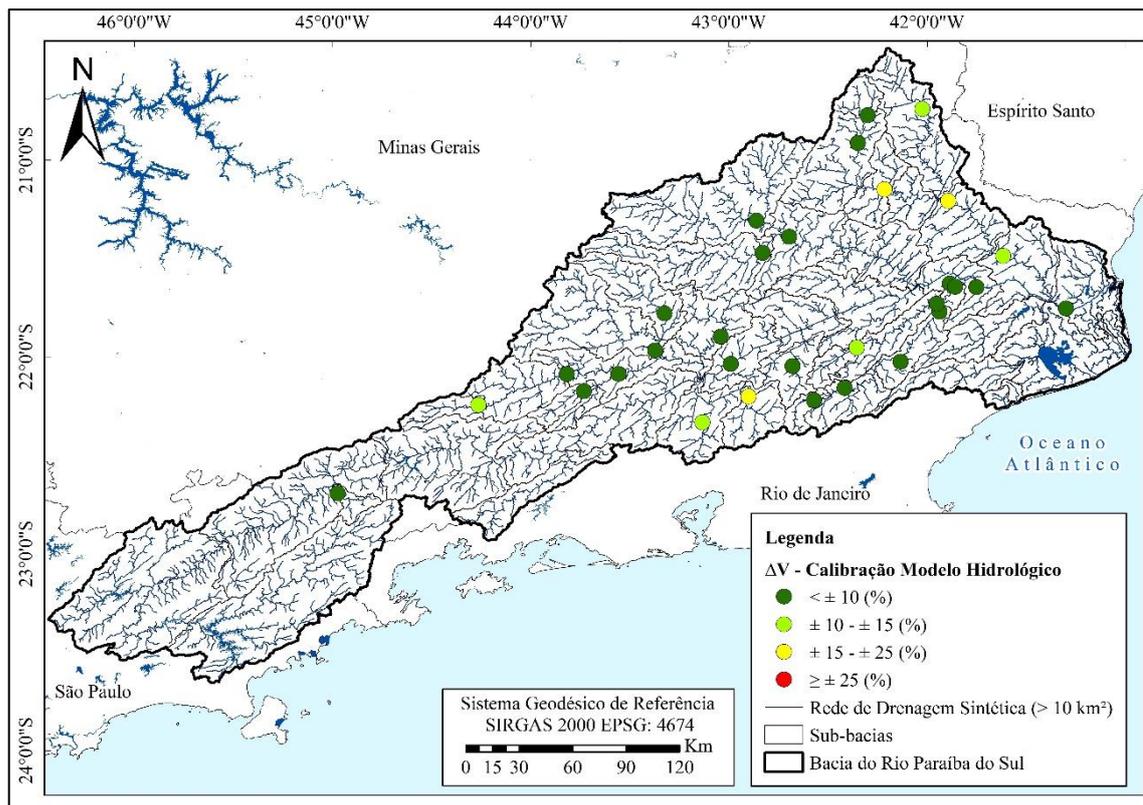


Figura 33 - Espacialização dos resultados do erro de volume do modelo hidrológico MGB-IPH para o período de calibração.

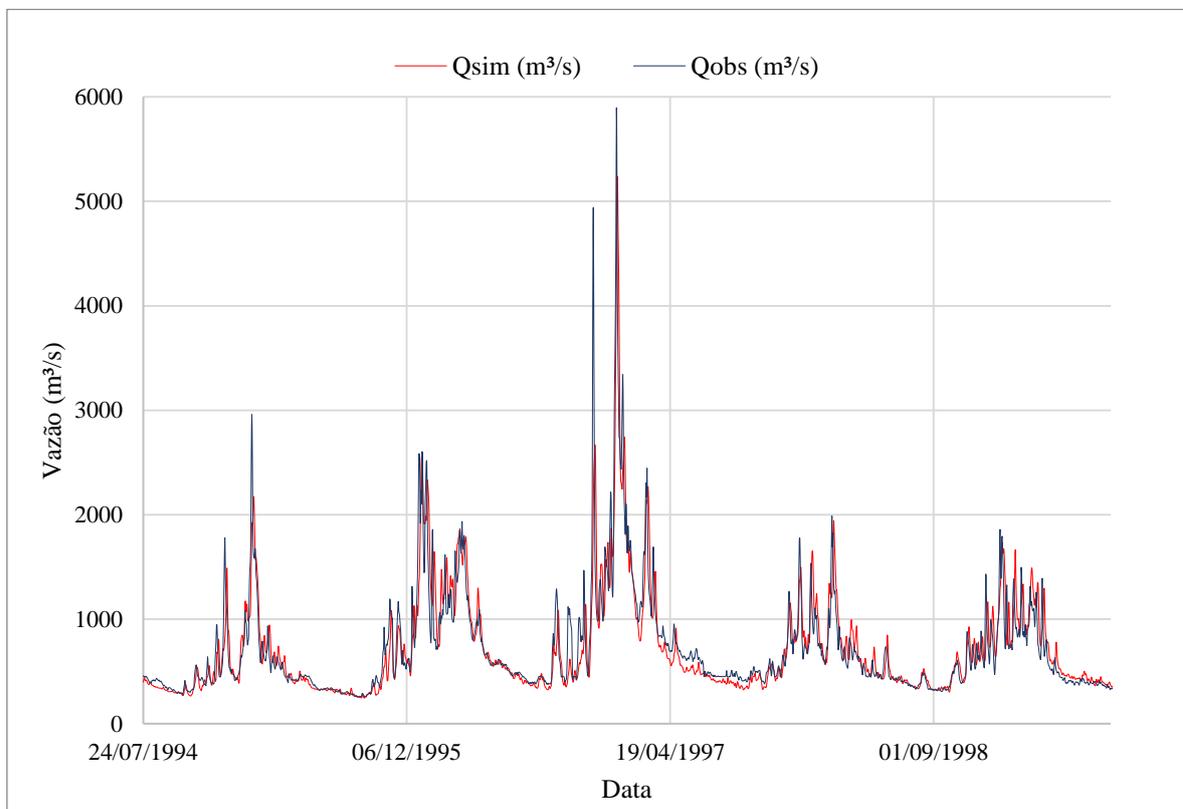
A partir das métricas de desempenho analisadas para o período de calibração do modelo hidrológico MGB-IPH conclui-se a obtenção de uma bom desempenho em linhas gerais para a bacia inteira, apresentando apenas pequenas carências nas simulações das vazões de pico dos rios da bacia que acabaram por reduzir um pouco a métrica de desempenho de NASH para alguns postos da bacia.

Salienta-se que a parte alta da bacia a montante do ponto de substituição das vazões não foi possível de ser representada pelo modelo e por tanto não foi calibrada. Futuramente, deve-se avaliar a inserção de do módulo de reservatórios do MGB-IPH nesta região ou avaliar possíveis outras substituições de vazões para melhor representar a dinâmica hidrológica da região.

### 5.1.1.2 Hidrogramas

A seguir são apresentados os hidrogramas de vazões simuladas e observadas, referentes aos postos com medições de sedimento na bacia utilizados na calibração do modelo. Os hidrogramas de todos os postos simulados na etapa de calibração, e também de validação do modelo, se encontram no anexo IV representados para todo o período de simulação.

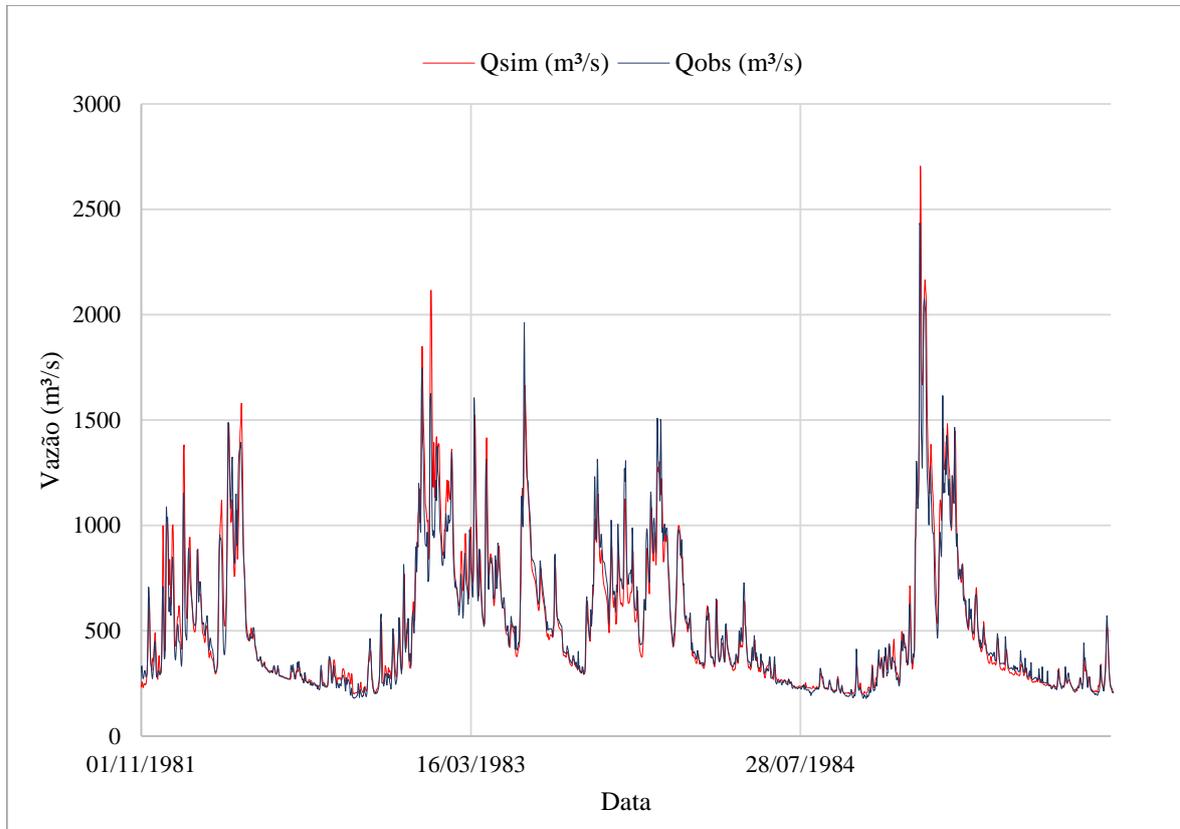
A Figura 34 apresenta os hidrogramas calculado e observado no rio Paraíba do Sul no posto mais a jusante da bacia (Campos – Ponte Municipal – 58974000). O posto apresenta ambas as três métricas de desempenho consideradas muito satisfatórias e a partir da figura é possível perceber que o modelo apresentou boas simulações de vazões tanto para os picos quanto as vazões de base.



*Figura 34 - Hidrograma simulado e observado no rio Paraíba do Sul no posto Campos - Ponte Municipal (58974000), para o período de calibração do modelo hidrológico MGB-IPH.*

A Figura 35 apresenta os hidrogramas calculado e observado no rio Paraíba do Sul no posto Anta G (58630002) situado logo a jusante do ponto de substituição de vazões do modelo. Esse posto também apresenta métricas de desempenho muito boas, para todas as métricas de desempenho, e a análise visual das vazões simuladas frente às vazões observadas indica que o modelo foi capaz de representar bem a propagação das vazões substituídas sobre forte

influência de reservatórios e transposições e representar fidedignamente a dinâmica das vazões do rio Paraíba do Sul na região do posto.



*Figura 35 - Hidrograma simulado e observado no rio Paraíba do Sul no posto Anta G (58630002), para o período de calibração do modelo hidrológico MGB-IPH.*

A Figura 36 apresenta as vazões simuladas e observadas para o posto Cardozo Moreira (58960000) no rio Muriaé, um dos principais tributários do rio Paraíba do sul. O posto apresentou resultados muito bons para NASHlog, satisfatórios para NASH e bons para o erro de volume indicando que as vazões de pico do hidrograma não foram muito bem representadas pelo modelo, mas em linhas gerais as simulações se apresentaram de forma satisfatório como é possível ver na figura.

A Figura 37 apresenta o hidrograma das vazões simuladas e observadas para o posto Cataguases (5877000) no rio Pompa, também um dos principais tributários do rio Paraíba do Sul. o posto apresentou resultados muito bons para toda as métricas de desempenho analisadas e visualmente as vazões simuladas se assemelham muito aos dados medidos.

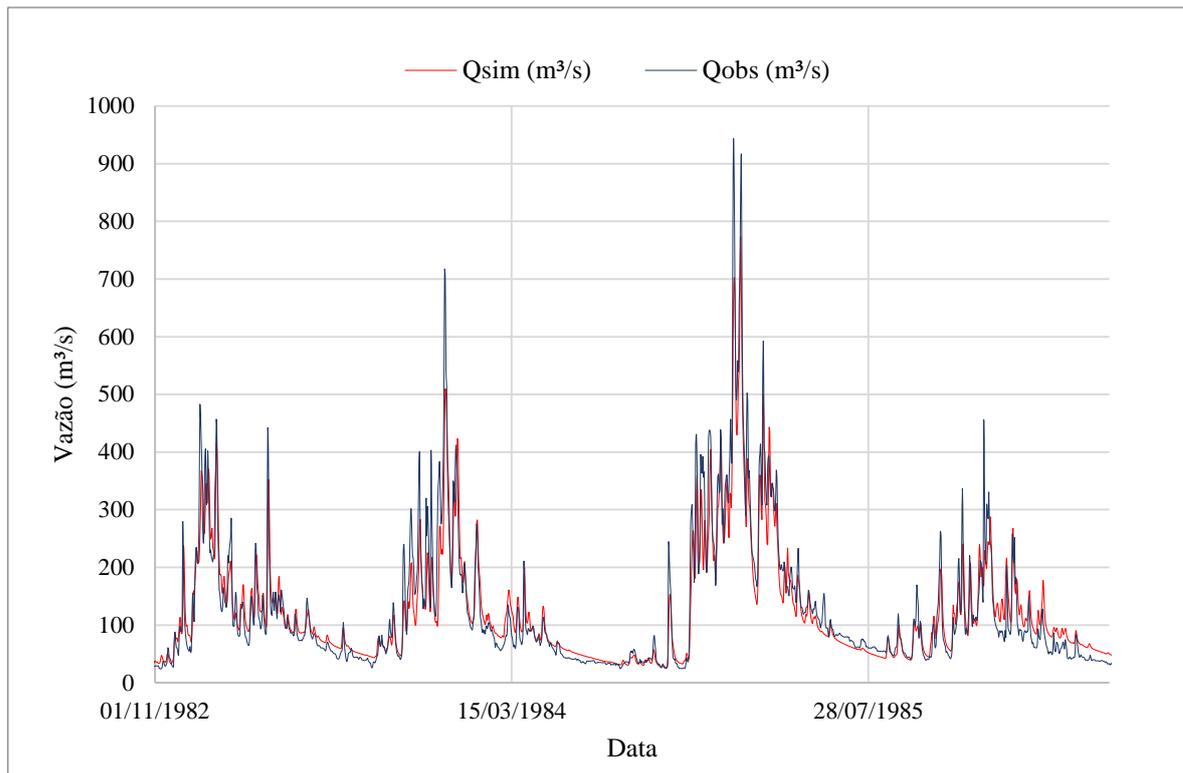


Figura 36 - Hidrograma simulado e observado no rio Muriaé no posto Cardozo Moreira (58960000), para o período de calibração do modelo hidrológico MGB-IPH.

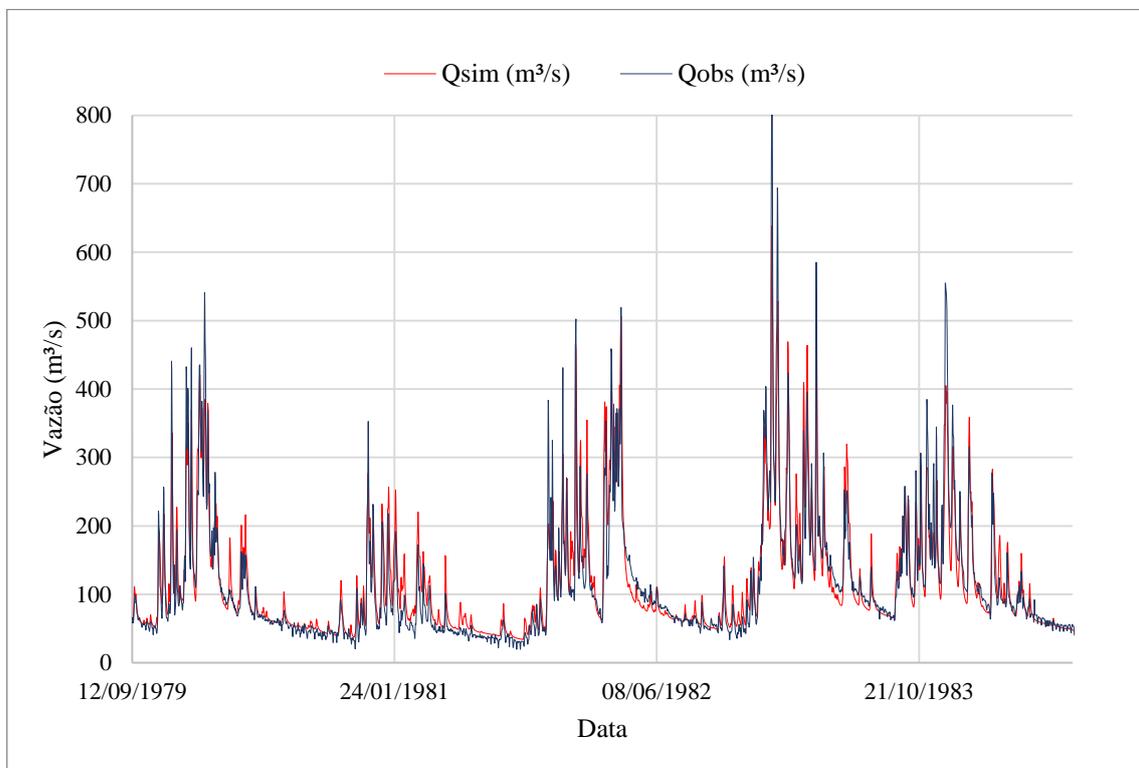


Figura 37 - Hidrograma simulado e observado no rio Pomba no posto Cataguases (58770000), para o período de calibração do modelo hidrológico MGB-IPH.

A Figura 38 apresenta o hidrograma das vazões simuladas e observadas para o posto Juiz de fora – Jusante (58480500), no rio de cabeceira Paraíbuna, único posto que apresentou uma das métricas de desempenho como insatisfatória, porém analisando de forma visual, em alguns momentos do período simulado, o modelo representa bem o comportamento geral do regime e vazões.

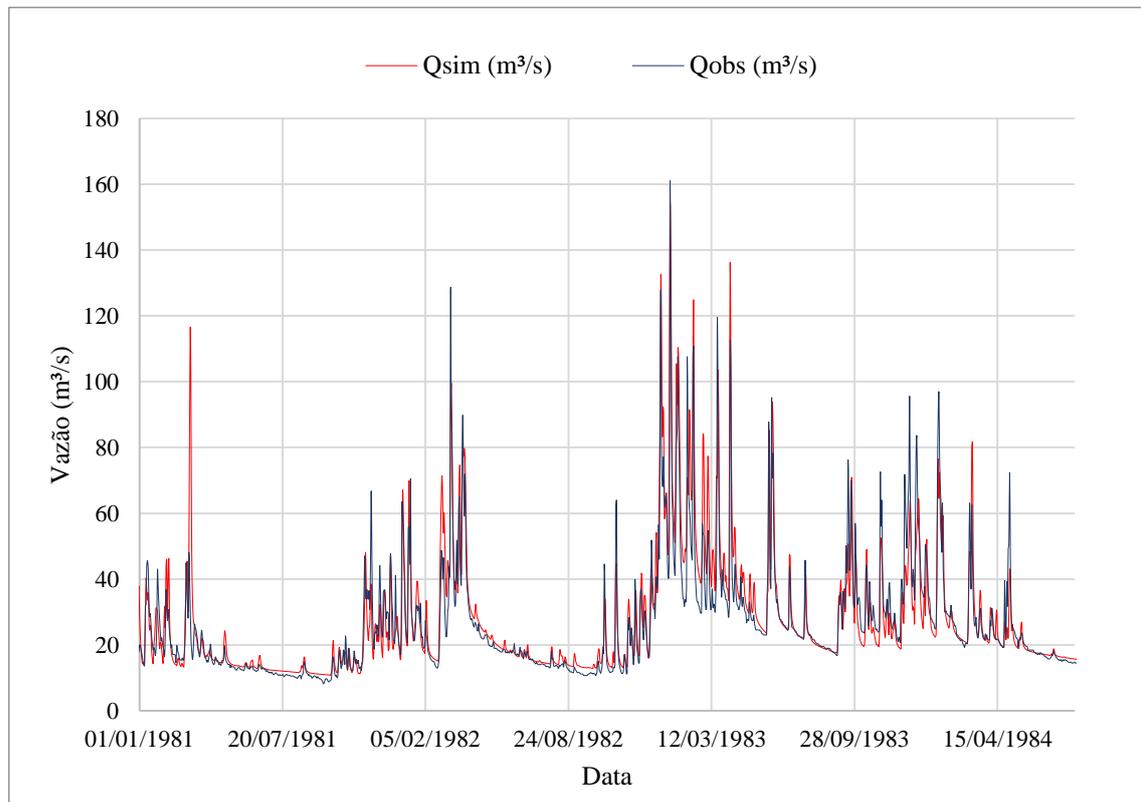


Figura 38 - Hidrograma simulado e observado no rio Paraíbuna no posto juiz de fora – Jusante (58480500) para o período de calibração do modelo hidrológico MGB-IPH.

### 5.1.2 Resultados da Validação

Nos próximos itens são descritos e apresentados os resultados referentes às vazões simuladas para o período de validação do modelo MBG-IPH, estipulado entre 02/01/2000 e 31/12/2010.

#### 5.1.2.1 Métricas de desempenho

A Tabela 13 apresenta os postos fluviométricos utilizados na validação do modelo, seu código e rio e as métricas de desempenho de Nash-Sutcliffe, logaritmo de Nash-Sutcliffe e erro de volume. Os resultados do modelo, assim como no período de calibração, também foram

representados em mapas contendo a sua localização espacial na bacia e faixas de cores, referentes aos intervalos de classificação dos resultados em muito bons, bons, satisfatórios e insatisfatórios descritos anteriormente. Os postos utilizados na validação do modelo de sedimentos se encontram grifados na tabela.

Tabela 13 - Métricas de desempenho para o período de validação do modelo Hidrológico MGB-IPH.

CÓDIGO	RIO	NASH	NASHlog	$\Delta V$
58220000	RIO BOCAINA	0,342	0,572	7,572
58405000	RIO PIABANHA	0,675	0,831	-7,44
58420000	RIO PRETO	0,571	0,79	7,359
<b>58480500</b>	<b>RIO PARAÍBUNA</b>	<b>0,346</b>	<b>0,514</b>	<b>5,798</b>
58520000	RIO PARAÍBUNA	0,674	0,827	11,359
58535000	RIO PRETO	0,685	0,874	-7,657
58550001	RIO PRETO	0,828	0,902	1,368
58573000	RIO BONITO	0,399	0,541	20,787
58585000	RIO PRETO	0,831	0,873	1,425
58610000	RIO CAGADO	0,657	0,756	-0,103
58630002	RIO PARAÍBA DO SUL	0,909	0,94	2,501
58645000	RIO PAQUEQUER	0,541	0,661	8,033
58735000	RIO POMBA	0,797	0,827	6,944
58765001	RIO NOVO	0,787	0,719	-6,469
<b>58770000</b>	<b>RIO POMBA</b>	<b>0,835</b>	<b>0,864</b>	<b>5,519</b>
58795000	RIO PARAÍBA DO SUL	0,733	0,806	6,669
58825000	RIO GRANDE	0,641	0,816	3,012
58827000	RIO GRANDE	0,715	0,766	7,412
58846000	RIO GRANDE	0,779	0,844	11,509
58850000	RIO GRANDE	0,792	0,838	19,339
58857000	RIO NEGRO	0,522	0,549	13,997
58870000	RIO NEGRO	0,63	0,651	23,518
58874000	RIO DOIS RIOS	0,569	0,812	17,672
58880001	RIO PARAÍBA DO SUL	0,7	0,797	6,475
58916000	RIO GLÓRIA	0,712	0,819	4,479
58917000	RIO GLÓRIA	0,837	0,874	-0,169
58920000	RIO MURIAÉ	0,703	0,673	26,974
58930000	RIO CARANGOLA	0,844	0,825	16,58
58940000	RIO MURIAÉ	0,666	0,761	26,824
<b>58960000</b>	<b>RIO MURIAÉ</b>	<b>0,768</b>	<b>0,839</b>	<b>16,163</b>
<b>58974000</b>	<b>RIO PARAÍBA DO SUL</b>	<b>0,723</b>	<b>0,784</b>	<b>14,238</b>
*Baseado em valores absolutos	Média dos Valores	0,684	0,772	10,0173*
	Valor Máximo	0,909	0,94	26,974*
	Valor Mínimo	0,342	0,514	0,103*
	Desvio Padrão	0,143	0,111	7,666*

A Figura 39 apresenta um histograma de frequência que descreve a quantidade de estações com resultados enquadrados em cada classe de performance do modelo, para as diferentes métricas utilizadas, no período de validação. Ao analisar os dados e a figura é possível perceber que a validação do modelo hidrológico também obteve resultados satisfatórios. O número de postos considerados muito bons reduziu-se um pouco para a métrica de desempenho de NASH, comparados aos dados da calibração indicando que as predições de vazões de pico ficaram um pouco piores, no geral, do que no período de calibração. Em contra partida, os dados obtidos através da métrica de NASHLog melhoraram, apresentando mais de 70% dos postos considerados muito bons e nenhum considerado insatisfatório. Os erros de volume no período de calibração também foram um pouco reduzidos apresentando dois postos com medições insatisfatórias que apresentaram melhores resultados no período de calibração.

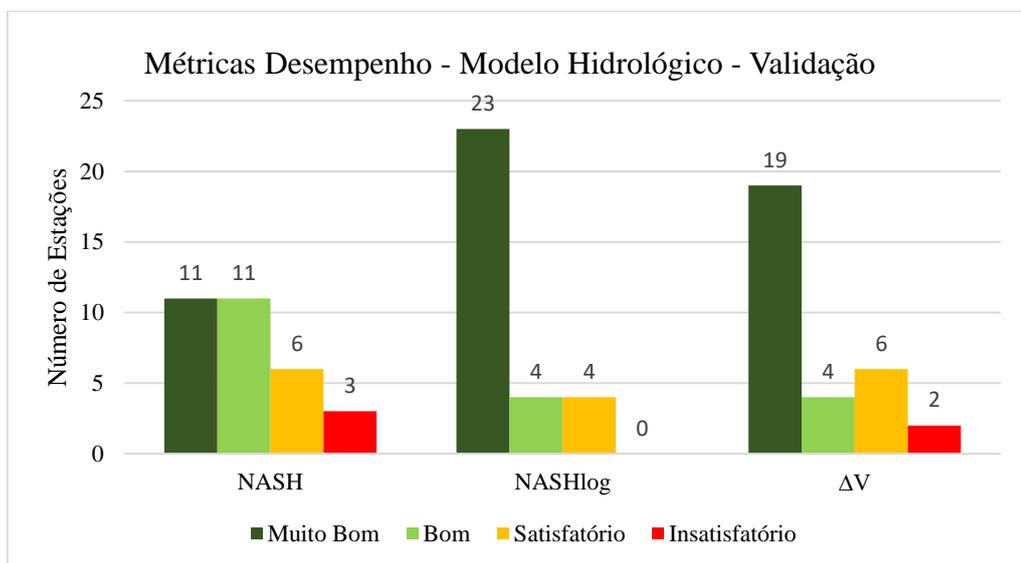


Figura 39 - Histograma de frequência da quantidade de estações para cada classe de performance de cada métrica de desempenho do período de validação do modelo hidrológico MGB-IPH.

A Figura 40 apresenta o mapa de valores de Nash-Sutcliffe obtidos para os postos da bacia no período de validação. O número de postos com medições insatisfatórias aumentou de dois para três incluindo o posto Juiz de fora – Jusante (58480500), selecionado para calibração e validação do modelo de sedimentos MGB-SED. A Figura 41 apresenta o mapa de valores do logaritmo de Nash-Sutcliffe para os postos da bacia no período de validação. O número de postos com valores considerados muito bons aumentou de 19 para 23 indicando melhorias no modelo em simular as vazões de base da bacia no período. A Figura 42 apresenta os valores do erro de volume onde obteve-se uma pequena piora nos valores reduzindo o número de postos com valores muito bons e aparecendo dois postos com valores insatisfatórios.

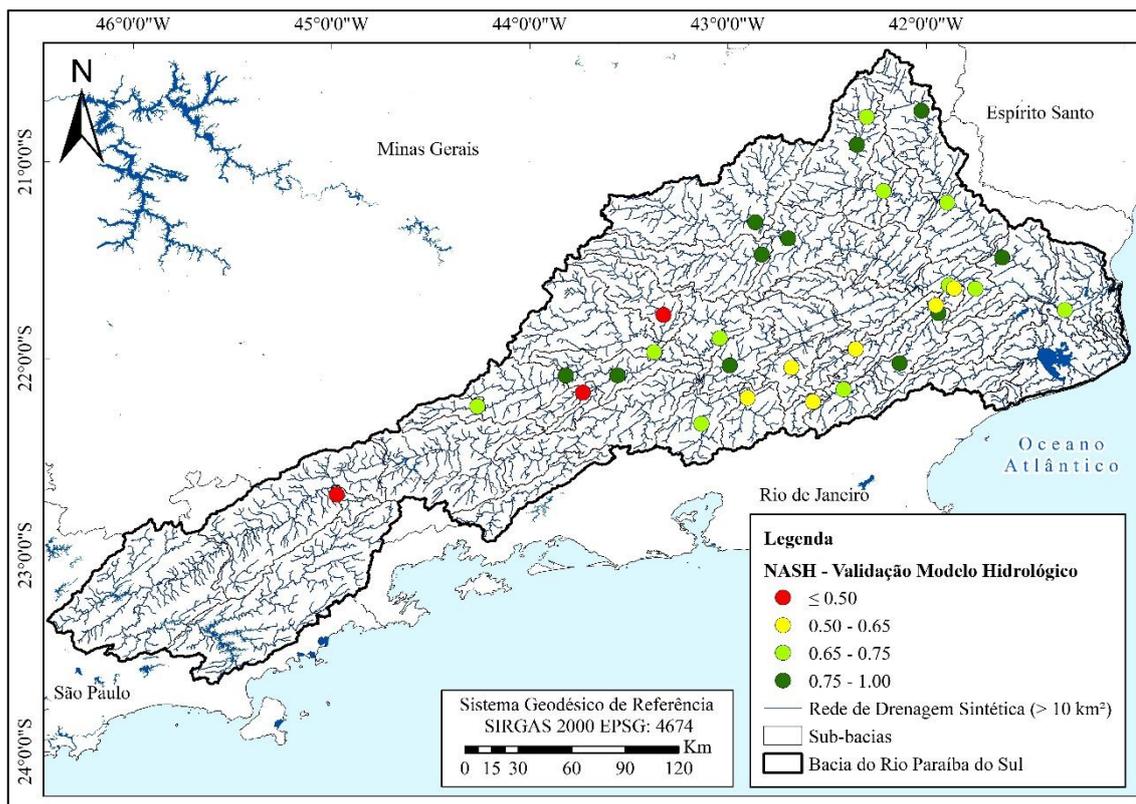


Figura 40 - Espacialização dos resultados de Nash-Sutcliffe do modelo hidrológico MGB-IPH para o período de validação.

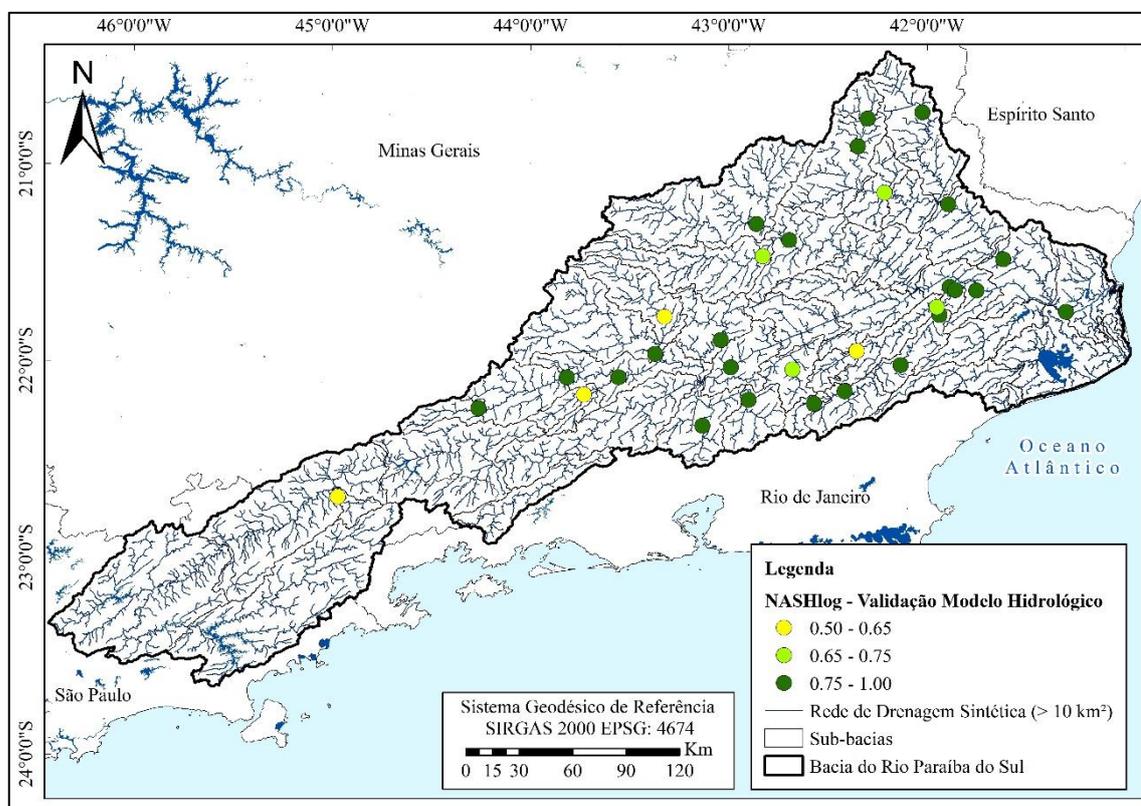


Figura 41 - Espacialização dos resultados do logaritmo de Nash-Sutcliffe do modelo hidrológico MGB-IPH para o período de validação.

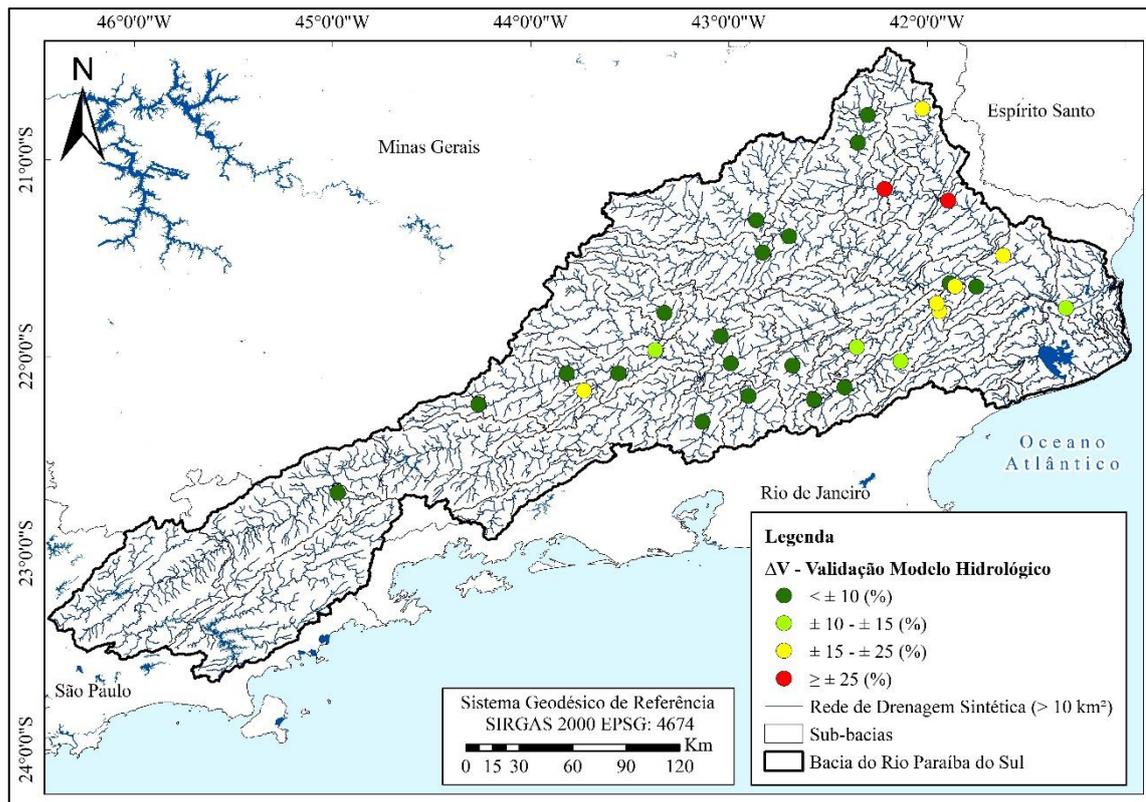


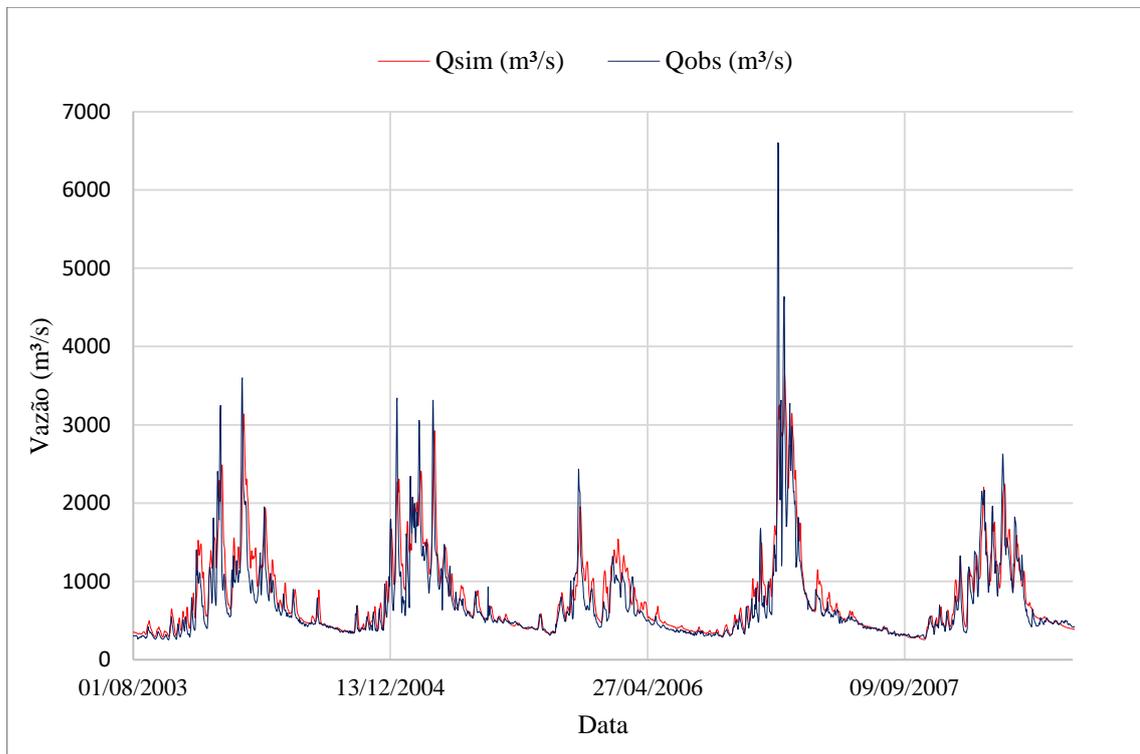
Figura 42 - Espacialização dos resultados do erro de volume do modelo hidrológico MGB-IPH para o período de validação.

Embora a validação do modelo tenha apresentado uma piora nos valores ótimos de Nash-Sutcliff as predições do modelo ainda são consideradas satisfatórias, sendo ainda mais de 56% dos dados considerados muito bons e menos de 10% insatisfatórios, considerando todas as métricas analisadas.

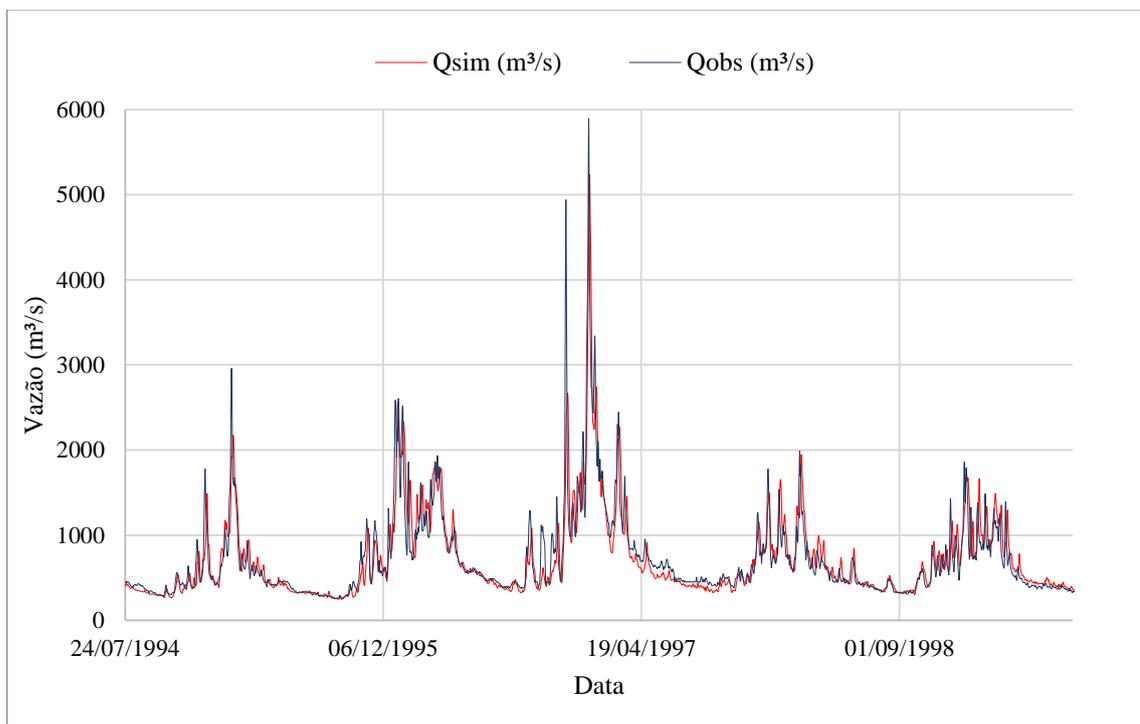
### 5.1.2.2 Hidrogramas

A seguir são apresentados os hidrogramas de vazões simuladas e observadas, referentes aos postos com medições de sedimento na bacia utilizados na validação do modelo. Também se encontra apresentado o hidrograma de vazões calculadas e observadas para o posto Santo Antônio de Pádua II (58790002 - Figura 44) que não foi incorporado das simulações do modelo hidrológico e portanto não foram calculadas métricas de desempenho para o posto. Porém através da visualização dos resultados é possível inferir que este apresenta boa correlação entre as simulações e vazões observadas no rio Pombo. A Figura 43, a Figura 45, e a Figura 46 apresentam os hidrogramas calculado e observados para os postos Campos – Ponte Municipal

(58974000) no rio Paraíba do Sul, Cardozo Moreira (58960000) no rio Muriaé e posto Cataguases (587700000) no rio Pomba, respectivamente.



**Figura 43 - Hidrograma simulado e observado no rio Paraíba do Sul no posto Campos - Ponte Municipal (58974000), para o período de validação do modelo hidrológico MGB-IPH.**



**Figura 44 - Hidrograma simulado e observado no rio Pomba no posto Santo Antônio de Pádua II (58790002), para o período de validação do modelo hidrológico MGB-IPH.**

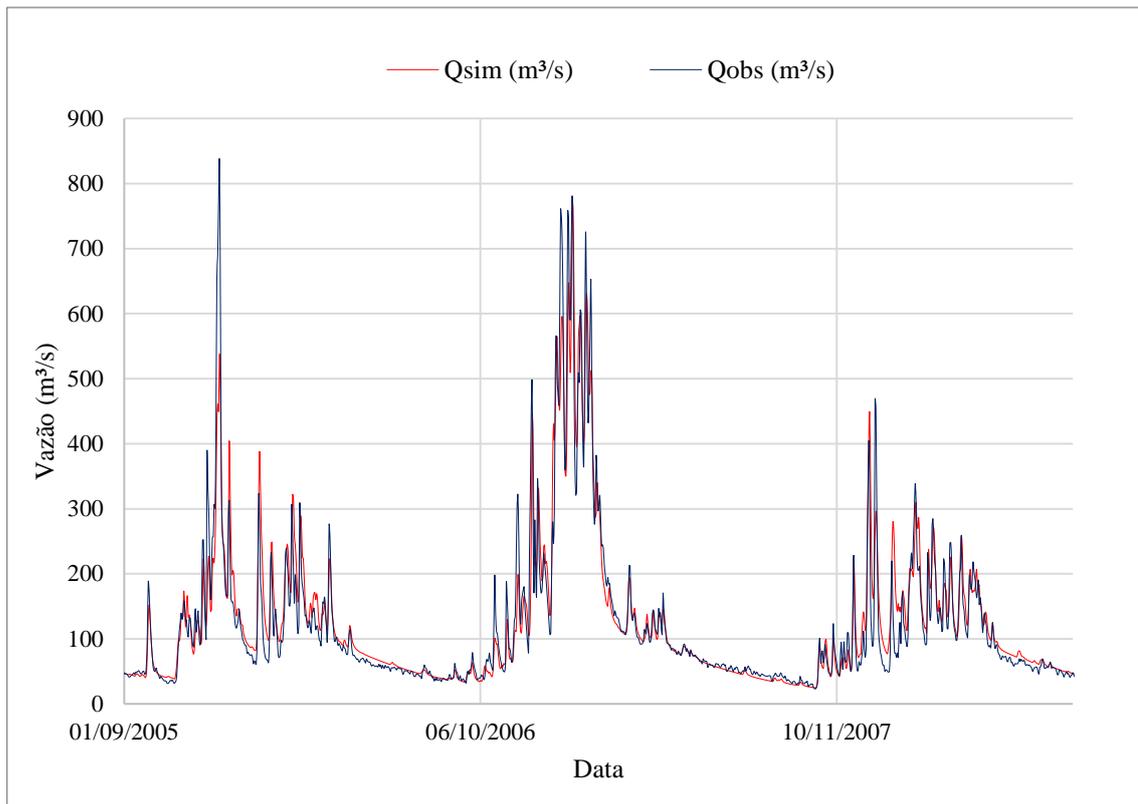


Figura 45 - Hidrograma simulado e observado no rio Muriaé no posto Cardozo Moreira (58960000), para o período de validação do modelo hidrológico MGB-IPH.

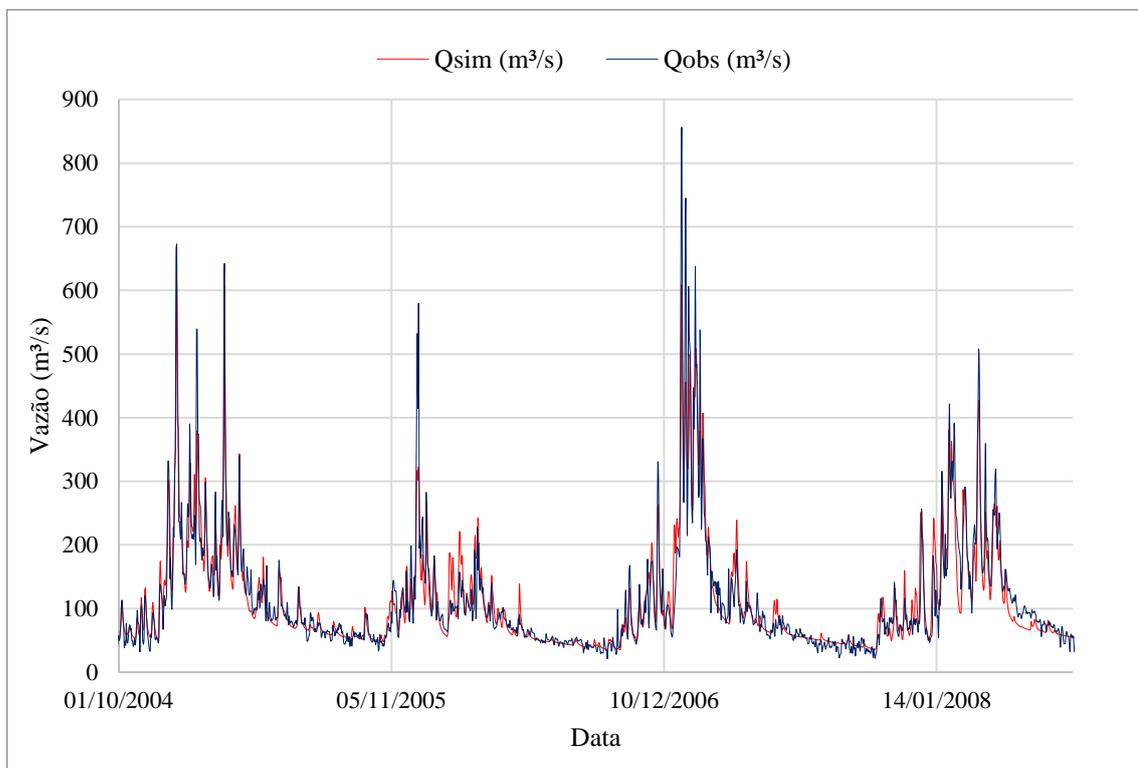


Figura 46 - Hidrograma simulado e observado no rio Pomba no posto Cataguases (58770000), para o período de validação do modelo hidrológico MGB-IPH.

A Figura 47 apresenta um comparativo indicando a piora nas simulações do posto fluviométrico com medições de sedimento Juiz de Fora – Jusante (58480500).

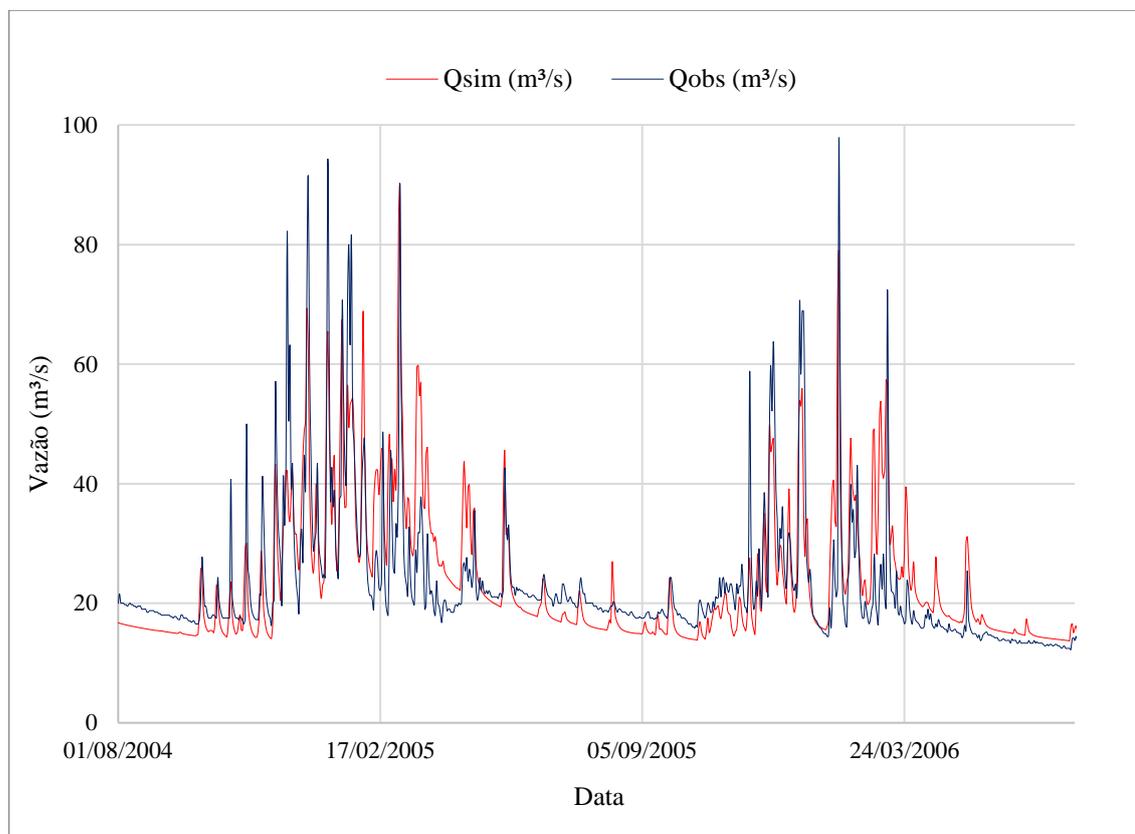


Figura 47 - Hidrograma simulado e observado no rio Paraíba no posto juiz de fora – Jusante (58480500, para o período de validação do modelo hidrológico MGB-IPH.

### 5.1.3 Calibração x Validação do Modelo Hidrológico

A Tabela 14 apresenta um comparativo entre as diferenças absolutas dos períodos de calibração e validação do modelo MGB-IPH para a bacia do rio Paraíba do sul. Em azul salienta-se as melhoras nas simulações do período de validação, frente ao período de calibração, e em vermelho são indicadas piores nas métricas de desempenho analisadas pelo modelo.

Tabela 14 - Comparação das métricas de desempenho do modelo hidrológico MGB-IPH para o período de calibração e validação.

CÓDIGO	RIO	NASH			NASHlog			ΔV		
		Cal	Val	Δ	Cal	Val	Δ	Cal	Val	Δ
58220000	RIO BOCAINA	0,32	0,34	<b>0,03</b>	0,45	0,57	<b>0,12</b>	-0,99	7,57	<b>-6,59</b>
58405000	RIO PIABANHA	0,66	0,68	<b>0,01</b>	0,74	0,83	<b>0,09</b>	13,85	-7,44	<b>6,41</b>
58420000	RIO PRETO	0,40	0,57	<b>0,17</b>	0,67	0,79	<b>0,12</b>	23,12	7,36	<b>15,76</b>
58480500	RIO PARAÍBUNA	0,60	0,35	<b>-0,26</b>	0,44	0,51	<b>0,07</b>	-9,26	5,80	<b>3,46</b>

CÓDIGO	RIO	NASH			NASHlog			ΔV		
		Cal	Val	Δ	Cal	Val	Δ	Cal	Val	Δ
58520000	RIO PARAÍBUNA	0,87	0,67	<b>-0,19</b>	0,88	0,83	<b>-0,05</b>	-6,46	11,36	<b>-4,90</b>
58535000	RIO PRETO	0,71	0,69	<b>-0,02</b>	0,84	0,87	<b>0,04</b>	-11,77	-7,66	<b>4,11</b>
58550001	RIO PRETO	0,85	0,83	<b>-0,02</b>	0,91	0,90	<b>-0,01</b>	-5,08	1,37	<b>3,71</b>
58573000	RIO BONITO	0,53	0,40	<b>-0,13</b>	0,64	0,54	<b>-0,10</b>	-3,54	20,79	<b>-17,25</b>
58585000	RIO PRETO	0,86	0,83	<b>-0,03</b>	0,92	0,87	<b>-0,04</b>	-6,25	1,43	<b>4,82</b>
58610000	RIO CAGADO	0,70	0,66	<b>-0,04</b>	0,75	0,76	<b>0,01</b>	-1,07	-0,10	<b>0,97</b>
58630002	RIO PARAÍBA DO SUL	0,92	0,91	<b>-0,01</b>	0,94	0,94	<b>0,00</b>	-1,19	2,50	<b>-1,32</b>
58645000	RIO PAQUEQUER	0,47	0,54	<b>0,07</b>	0,59	0,66	<b>0,07</b>	-4,36	8,03	<b>-3,67</b>
58735000	RIO POMBA	0,83	0,80	<b>-0,03</b>	0,84	0,83	<b>-0,01</b>	-4,52	6,94	<b>-2,42</b>
58765001	RIO NOVO	0,81	0,79	<b>-0,02</b>	0,54	0,72	<b>0,18</b>	-7,67	-6,47	<b>1,20</b>
58770000	RIO POMBA	0,87	0,84	<b>-0,03</b>	0,87	0,86	<b>0,00</b>	4,99	5,52	<b>-0,53</b>
58795000	RIO PARAÍBA DO SUL	0,73	0,73	<b>0,00</b>	0,83	0,81	<b>-0,02</b>	3,35	6,67	<b>-3,32</b>
58825000	RIO GRANDE	0,61	0,64	<b>0,03</b>	0,77	0,82	<b>0,05</b>	7,04	3,01	<b>4,03</b>
58827000	RIO GRANDE	0,69	0,72	<b>0,03</b>	0,77	0,77	<b>-0,01</b>	8,92	7,41	<b>1,51</b>
58846000	RIO GRANDE	0,80	0,78	<b>-0,02</b>	0,81	0,84	<b>0,03</b>	-4,65	11,51	<b>-6,86</b>
58850000	RIO GRANDE	0,78	0,79	<b>0,01</b>	0,83	0,84	<b>0,01</b>	3,53	19,34	<b>-15,81</b>
58857000	RIO NEGRO	0,72	0,52	<b>-0,20</b>	0,71	0,55	<b>-0,17</b>	-11,37	14,00	<b>-2,63</b>
58870000	RIO NEGRO	0,75	0,63	<b>-0,12</b>	0,79	0,65	<b>-0,14</b>	1,35	23,52	<b>-22,17</b>
58874000	RIO DOIS RIOS	0,77	0,57	<b>-0,20</b>	0,85	0,81	<b>-0,04</b>	1,15	17,67	<b>-16,53</b>
58880001	RIO PARAÍBA DO SUL	0,75	0,70	<b>-0,05</b>	0,84	0,80	<b>-0,04</b>	-0,10	6,48	<b>-6,38</b>
58916000	RIO GLÓRIA	0,63	0,71	<b>0,08</b>	0,74	0,82	<b>0,08</b>	-6,48	4,48	<b>2,00</b>
58917000	RIO GLÓRIA	0,70	0,84	<b>0,14</b>	0,78	0,87	<b>0,09</b>	-6,44	-0,17	<b>6,27</b>
58920000	RIO MURIAÉ	0,64	0,70	<b>0,06</b>	0,67	0,67	<b>0,01</b>	21,29	26,97	<b>-5,68</b>
58930000	RIO CARANGOLA	0,66	0,84	<b>0,18</b>	0,75	0,83	<b>0,08</b>	-12,97	16,58	<b>-3,61</b>
58940000	RIO MURIAÉ	0,53	0,67	<b>0,14</b>	0,71	0,76	<b>0,05</b>	21,28	26,82	<b>-5,54</b>
58960000	RIO MURIAÉ	0,65	0,77	<b>0,12</b>	0,81	0,84	<b>0,03</b>	10,11	16,16	<b>-6,05</b>
58974000	RIO PARAÍBA DO SUL	0,77	0,72	<b>-0,05</b>	0,81	0,78	<b>-0,02</b>	0,14	14,24	<b>-14,10</b>

Analisando os valores, é possível perceber as relações citadas no capítulo anterior, onde o modelo tendeu a apresentar leves pioras nos parâmetros de NASH e erro de volume e melhora na métrica de desempenho de NASHLog.

Por fim conclui-se que o modelo hidrológico foi calibrado e validado de forma eficiente, apresentando resultados bastante promissores que indicam que o modelo é capaz de representar a dinâmica de vazões de grande parte da bacia do rio Paraíba do Sul de forma bastante coerente.

## 5.2 Modelo de Sedimentos

A seguir são apresentados os principais resultados gerados através do modelo de sedimentos, contando com apresentação dos parâmetros finais da equação MUSLE adotados nas simulações, os resultados das métricas de desempenho, para os períodos de calibração e validação, espacialização das métricas para a descarga sólida de sedimentos ( $Q_{ss}$ ), sedimentogramas gerados para todos os postos de análise e os resultados da correlação entre as imagens de satélite e a concentração de sedimentos em suspensão simulada pelo modelo.

A análise dos dados correlacionados com a reflectância espectral da banda do vermelho dos satélites *Landsat* foi dividida, junto com os resultados gerais do modelo, para os períodos de calibração e validação, por se entender também ser uma métrica de verificação do desempenho do modelo hidrossedimentológico.

### 5.2.1 Parâmetros Finais da MUSLE

Ao analisar-se os dados de sedimentos obtidos para os postos a serem comparados os resultados do modelo de sedimento MGB-SED, percebeu-se que em média as concentrações de sedimentos medidas, na maioria dos postos de análise, apresentavam valores maiores para dados mais antigos entre as décadas de 70 e 90. Essa constatação dificultou a calibração do modelo para representação de todo período simulado (calibração e validação) com métricas de desempenho satisfatória. Neste sentido a introdução dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  da MUSLE foi de grande valia na calibração do modelo, permitindo estimar de forma mais próxima as altas concentrações observadas nas décadas mais antigas do período de calibração aumentando-se o valor de  $\beta$  e também representar as concentrações mais baixa do período de calibração reduzindo-se um pouco o parâmetro  $\alpha$ . Os valores finais de alfa e beta definidos foram de 11,15 e 0,77, respectivamente.

Os valores do fator C final da MUSLE para cada sub-bacia se encontram no Apêndice III, junto com os dados do solo do modelo hidrológico. As concentrações finais de silte, argila e areia que apresentaram melhores performances no modelo foram a soma de +3% de areia em cada sub-bacia com redução de 2% nas concentrações de argila e 1% nas concentrações de silte. As porcentagens finais também se encontram no Apêndice.

## 5.2.2 Resultados da Calibração

Nos próximos itens são descritos e apresentados os resultados referentes a descarga sólida (Qss) e às concentrações de sedimentos em suspensão (CSS), simuladas a partir do modelo de sedimentos MGB-SED, para o mesmo período de calibração do modelo hidrológico MBG-IPH, estipulado entre 01/01/1979 e 01/01/2000.

### 5.2.2.1 Métricas de Desempenho

A Tabela 15 apresenta os postos sedimentométricos utilizados na calibração do modelo, seu código e rio e as métricas de desempenho de Nash-sutcliffe, erro de volume e correlação de Pearson para a descarga sólida diária e a concentração de sólidos em suspensão, simuladas pelo modelo. Os resultados do modelo também foram representados em mapas contendo a sua localização espacial na bacia em faixas de cores referentes aos intervalos de classificação dos resultados em muito bons, bons, satisfatórios e insatisfatórios, descritos anteriormente, para a descarga sólida de sedimentos finos diária simulada pelo modelo.

*Tabela 15 – Métricas de desempenho para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED considerando a Descarga Sólida (Qss) e concentração de sedimentos em suspensão (CSS).*

Qss				
CÓDIGO	RIO	NASH	$\Delta V$	r
58974000	RIO PARAÍBA DO SUL	-0,218	-52,177	0,137
58960000	RIO MURIAÉ	0,181	-79,048	0,927
58630002	RIO PARAÍBA DO SUL	0,064	-55,310	0,499
58480500	RIO PARAÍBUNA	0,337	-49,457	0,660
58770000	RIO POMBA	0,548	-45,126	0,921
CSS				
CÓDIGO	RIO	NASH	$\Delta V$	r
58974000	RIO PARAÍBA DO SUL	-0,232	126,092	0,016
58960000	RIO MURIAÉ	0,035	-71,525	0,617
58630002	RIO PARAÍBA DO SUL	-0,403	-62,023	0,088
58480500	RIO PARAÍBUNA	-0,350	-78,079	0,065
58770000	RIO POMBA	0,271	-43,114	0,609

Ao analisar a tabela percebe-se que os valores de Nash-Sutcliffe para a concentração de sedimentos suspensos se apresentaram em maioria insatisfatórios, salvo os postos Cataguases (58770000) no rio Pomba e o posto Cardoso Moreira (58960000) no rio Muriaé, que

apresentaram resultados considerados satisfatórios apresentando também forte correlação de Pearson.

Usualmente, devido à grande dificuldade em realizar simulações hidrossedimentológicas, os dados são analisados em termos da descarga sólida, que analisados para os postos da bacia apresentaram valores de NASH satisfatórios a muito bons em cinco dos seis postos analisados, exceto no posto Campos – Ponte Municipal (58974000). Os valores do erro de volume ficaram na faixa entre satisfatório e bons, exceto para o posto Cardoso Moreira (5896000) que apresentou resultado insatisfatórios. Para o índice de correlação de Pearson foram apresentados dois pontos com valores muito bons, Cardoso Moreira (58960000) e Cataguases (58770000), um posto com valor bom, Juiz de Fora – Jusante (58480500), um posto com valor satisfatório, Anta G (58630002) e um posto com valor insatisfatório, Campos – Ponte Municipal (58974000). A Figura 48 apresenta um histograma de frequências que descreve a quantidade de estações com resultados enquadrados em cada classe de performance do modelo para as diferentes métricas utilizadas.

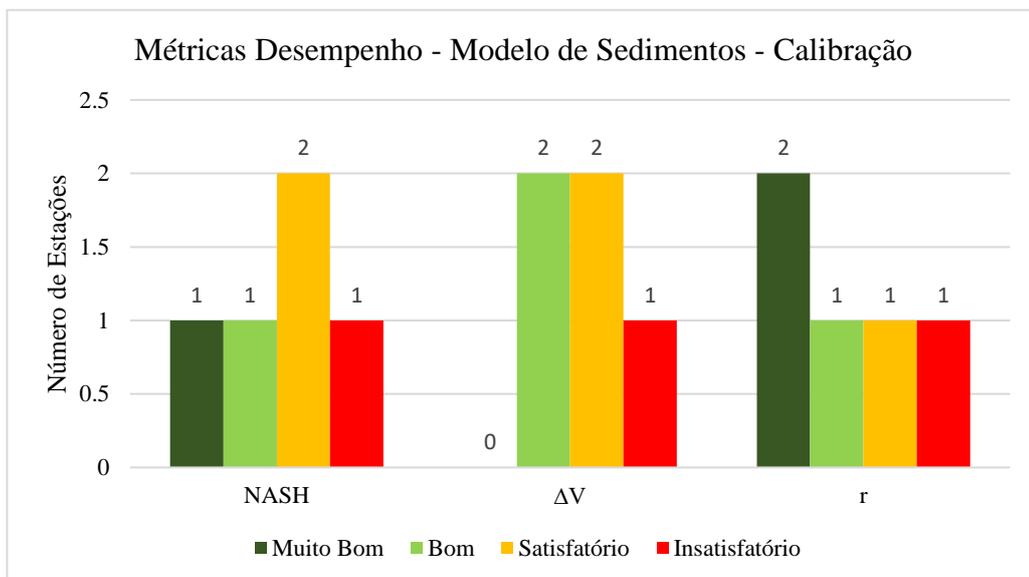


Figura 48 - Histograma de frequência da quantidade de estações para cada classe de performance de cada métrica de desempenho do período de calibração do modelo de Sedimentos MGB-SED.

Analisando os dados e a figura, percebe-se que o modelo em linhas gerais apresentou dados satisfatórios em geral, considerando a pouca quantidade de dados medidos para comparação com os dados simulados. Todas as métricas de desempenho apresentaram apenas um postos com dados insatisfatórios, salientando que as métricas ao serem convertidas para a

descarga sólida diária apresentaram resultados em geral melhores do que as métricas da concentração de sedimentos em suspensão.

A Figura 49, a Figura 50 e a Figura 51 apresentam a espacialização das faixas de valores para as métricas de desempenho de Nash-Sutcliffe, erro de volume e o índice de correlação de Pearson, respectivamente. o ponto cinza nas imagens representa o posto Antônio de Pádua II (58790002) que não foi considerado na calibração do modelo de sedimentos por não haver disponibilidade de dados no período de calibração do modelo.

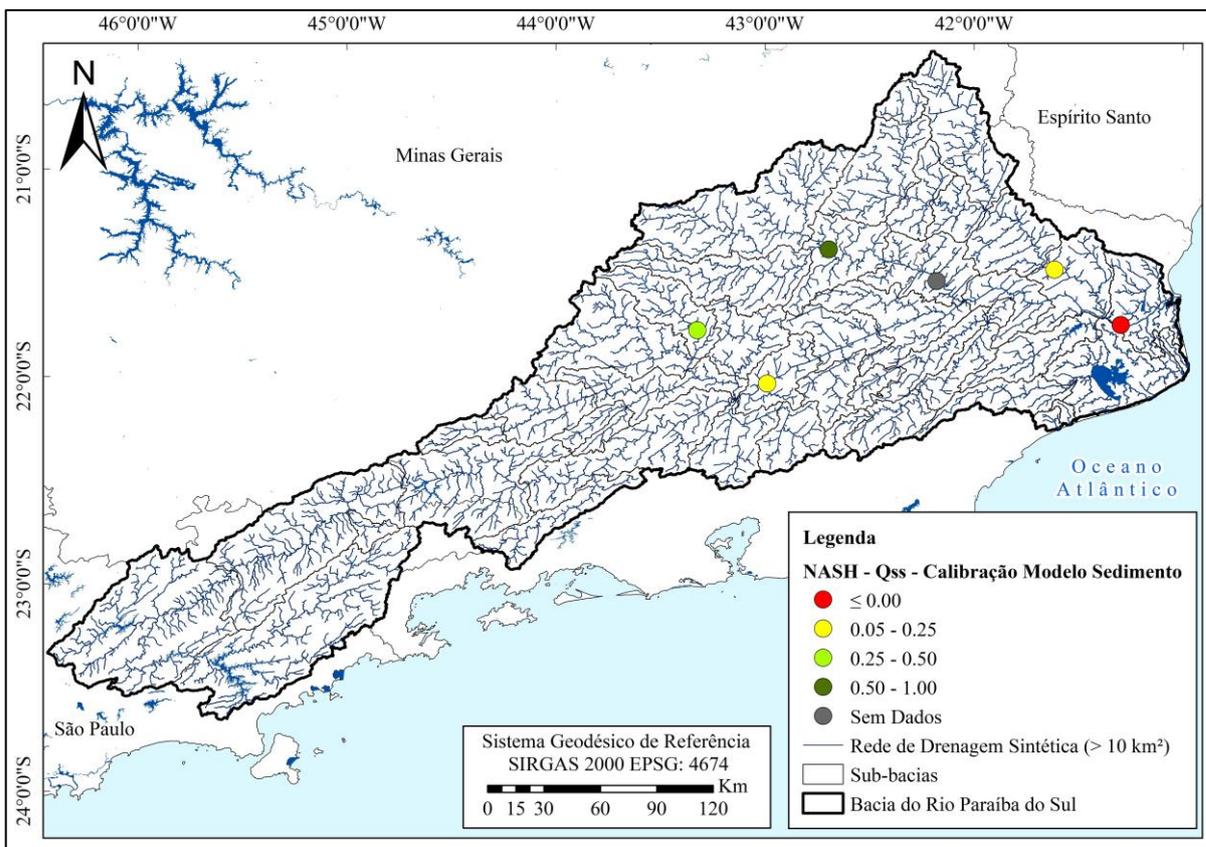


Figura 49 - Espacialização dos resultados de Nash-Sutcliffe para a  $Q_{ss}$  gerada pelo modelo MGB-SED para o período de calibração.

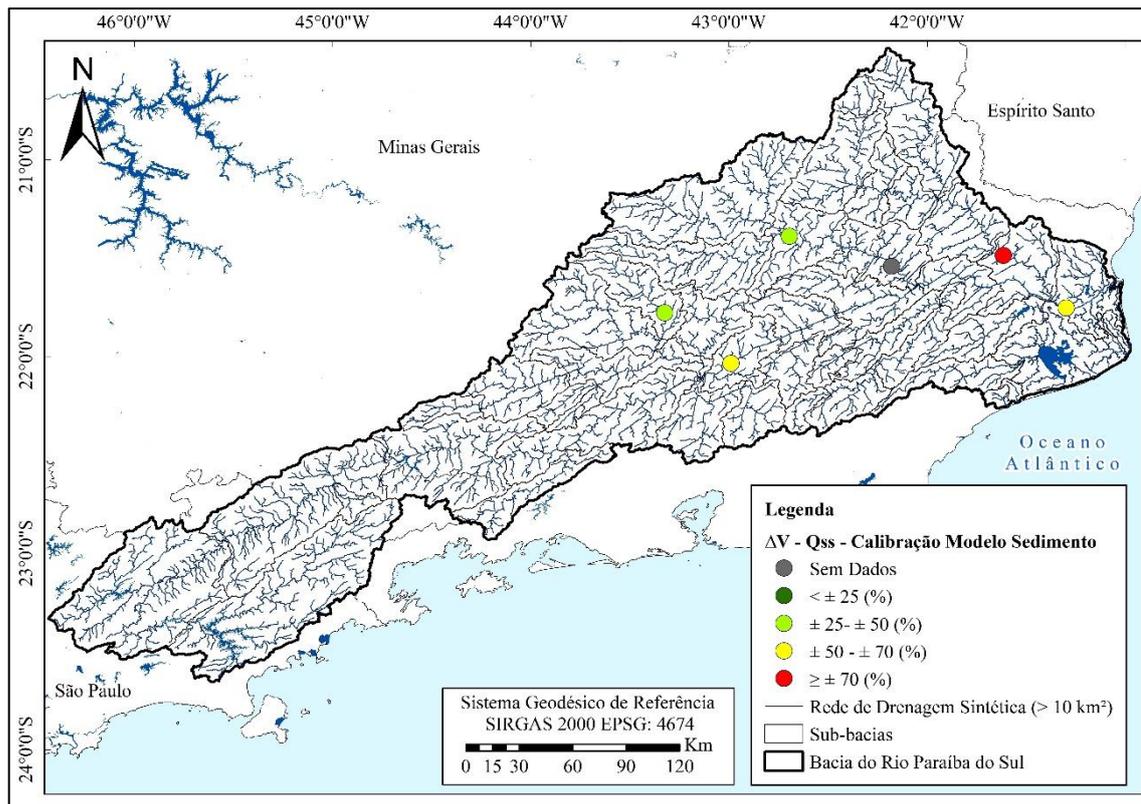


Figura 50 - Espacialização dos resultados do erro de volume para a Qss gerada pelo modelo MGB-SED para o período de calibração.

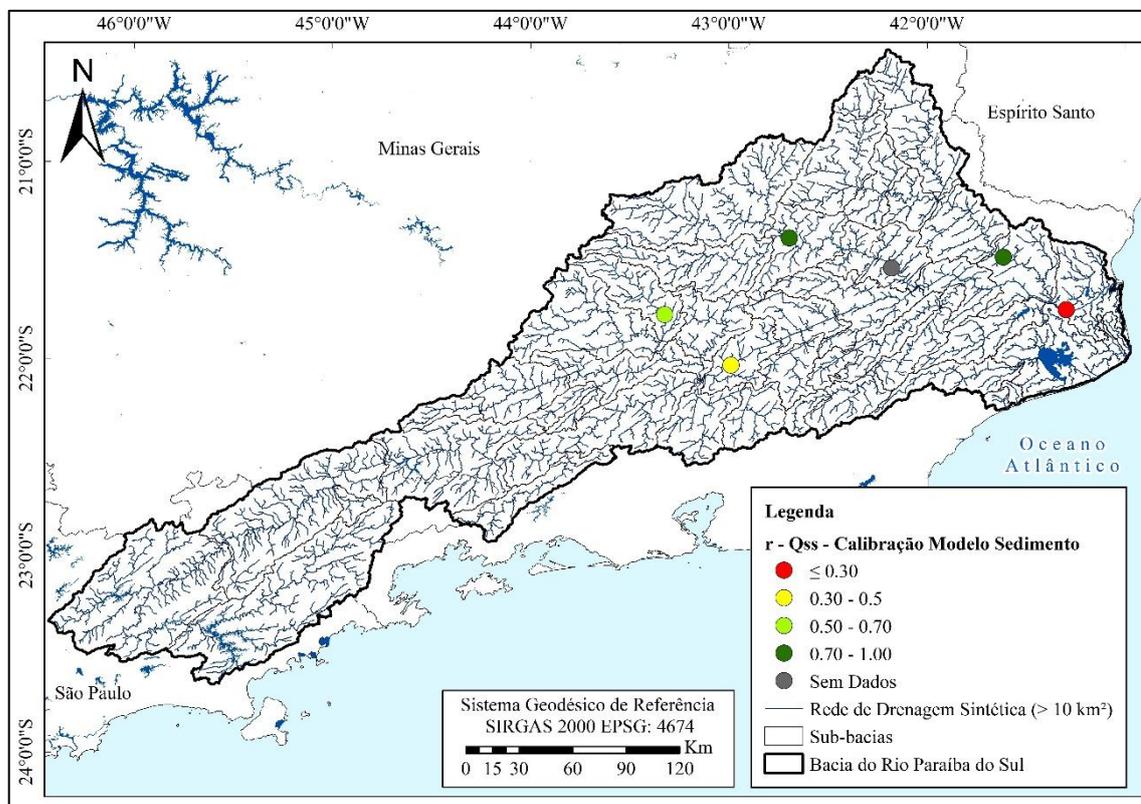


Figura 51 - Espacialização dos resultados da correlação de Pearson para a Qss gerada pelo modelo MGB-SED para o período de calibração.

### 5.2.2.2 Sedimentogramas

A seguir são apresentados os sedimentogramas referentes à descarga sólida e a concentração de sólidos em suspensão, simuladas a partir do modelo de sedimentos para o período de calibração em todos os postos selecionados com disponibilidade de dados do período. A Figura 51 e a Figura 52 apresentam as comparações entre a descarga sólida diária observada e simulada e a concentração de sólidos em suspensão observada e simulada, respectivamente, para o posto Campos – Ponte Municipal (58974000), no rio Paraíba do Sul.

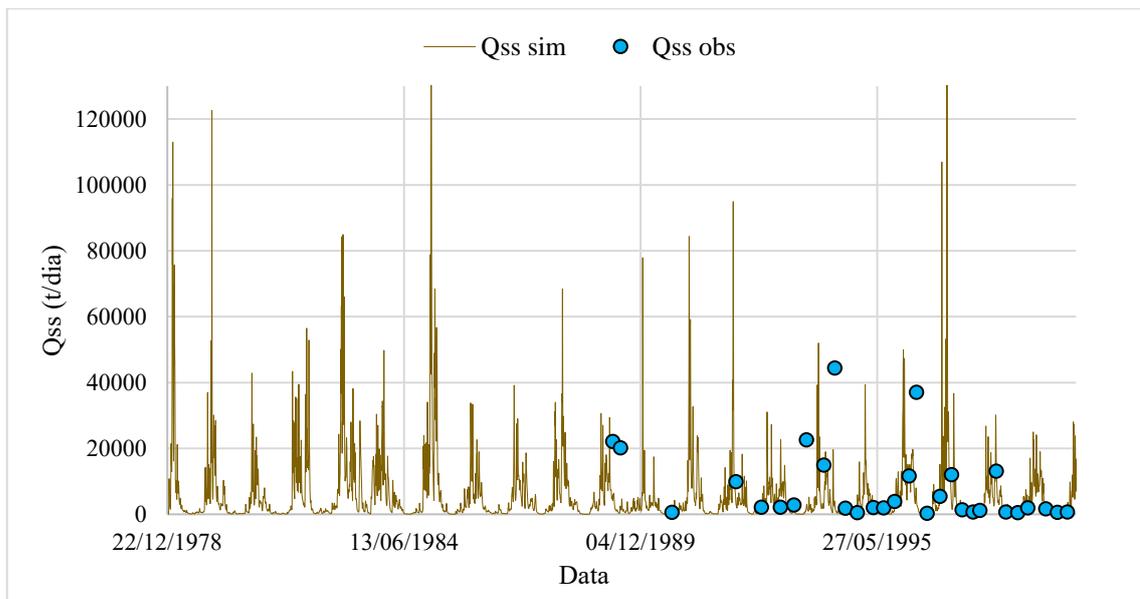


Figura 52 – Descarga sólida simulada e observada no rio Paraíba do Sul no posto Campos - Ponte Municipal (58974000), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED.

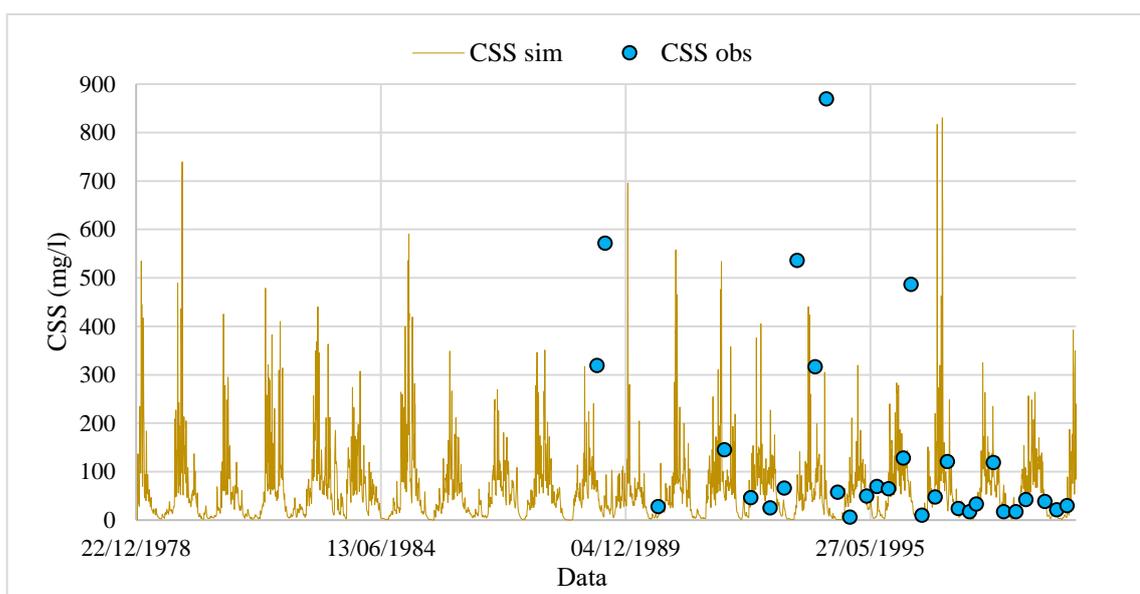
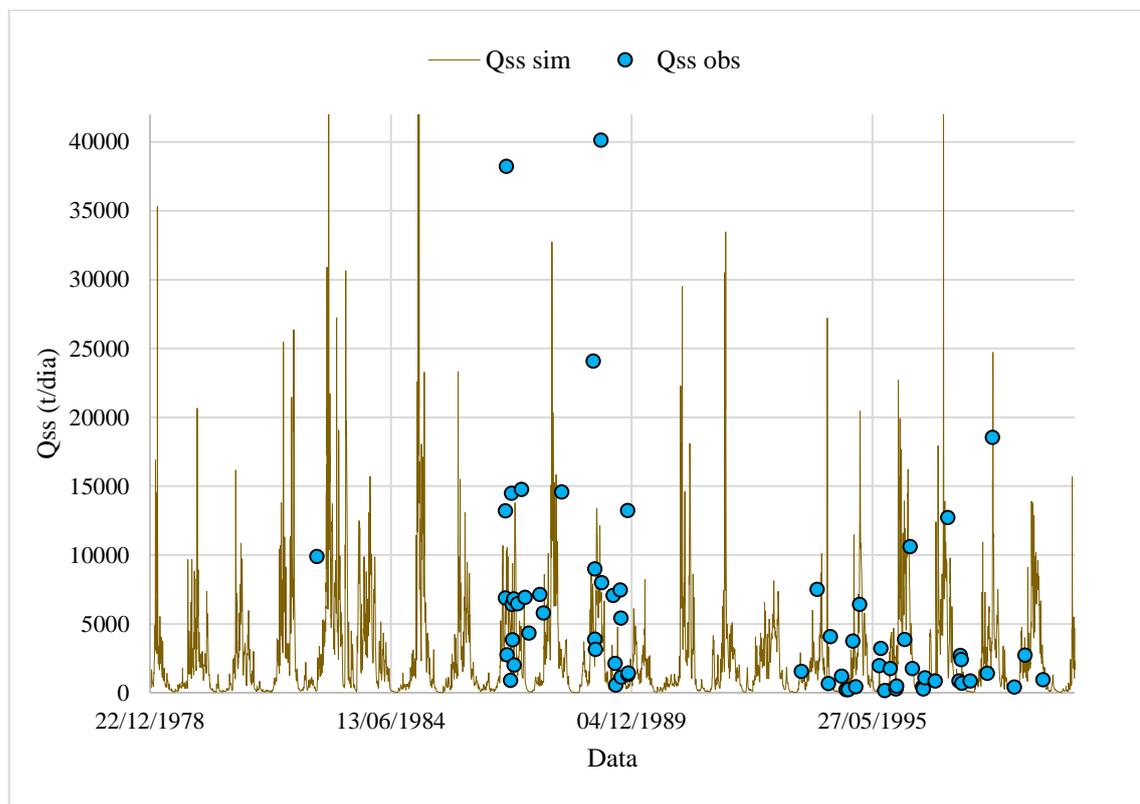


Figura 53 – Concentração de sólidos em suspensão simulada e observada no rio Paraíba do Sul no posto Campos - Ponte Municipal (58974000), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED.

Ao analisar os sedimentogramas do posto Campos – Ponte Municipal (58974000) é possível perceber que em termos de concentração de sólidos em suspensão alguns picos de altas concentrações observadas não foram representados pelo modelo. Porém em termos da descarga sólida diária os picos foram melhores representados pelo modelo indicando satisfatória correlação visual entre os dados simulados e observados mesmo que as métricas de desempenho analisadas não tenham apresentado, em geral, valores satisfatórios para este posto.

A Figura 54 e a Figura 55 apresentam as comparações entre a descarga sólida diária observada e simulada e a concentração de sólidos em suspensão observada e simulada, respectivamente, para o posto Anta G, no rio Paraíba do Sul. Ao analisar as figuras percebe-se que maiores concentrações de sedimentos entre os anos de 1986 e 1989 não foram representadas pelo modelo. Porém a partir de 1992 as concentrações mais baixas observadas foram melhor simuladas pelo modelo, valendo-se o mesmo para a descarga sólida gerada para este posto



*Figura 54 - Descarga sólida simulada e observada no rio Paraíba do Sul no posto Anta G (58630002), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED.*

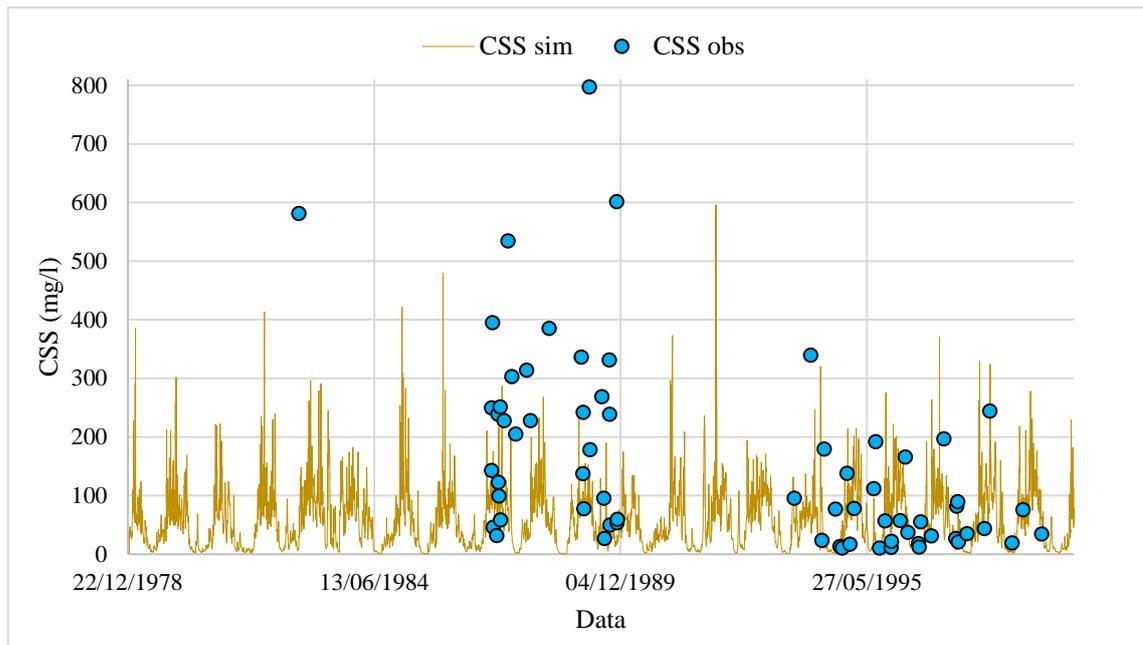


Figura 55 - Concentração de sólidos em suspensão simulada e observada no rio Paraíba do Sul no posto Anta G (58630002), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED.

A Figura 56 e a Figura 57 apresentam as comparações entre a descarga sólida diária observada e simulada e a concentração de sólidos em suspensão observada e simulada, respectivamente, para o posto Cardozo Moreira (58960000), no rio Muriaé. Esse posto apresentou elevada correlação de Pearson para o período e a análise visual dos dados indicam coerência nas simulações da concentração de sólidos em suspensão e da descarga sólida.

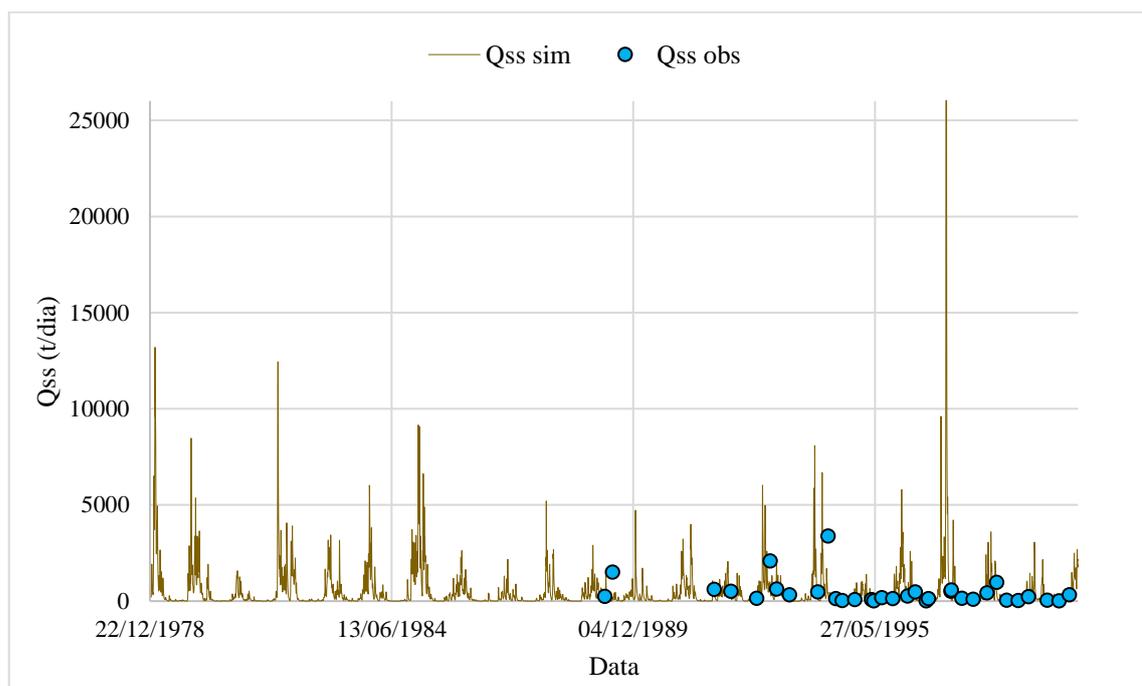


Figura 56 - Descarga sólida simulada e observada no rio Muriaé no posto Cardozo Moreira (58960000), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED.

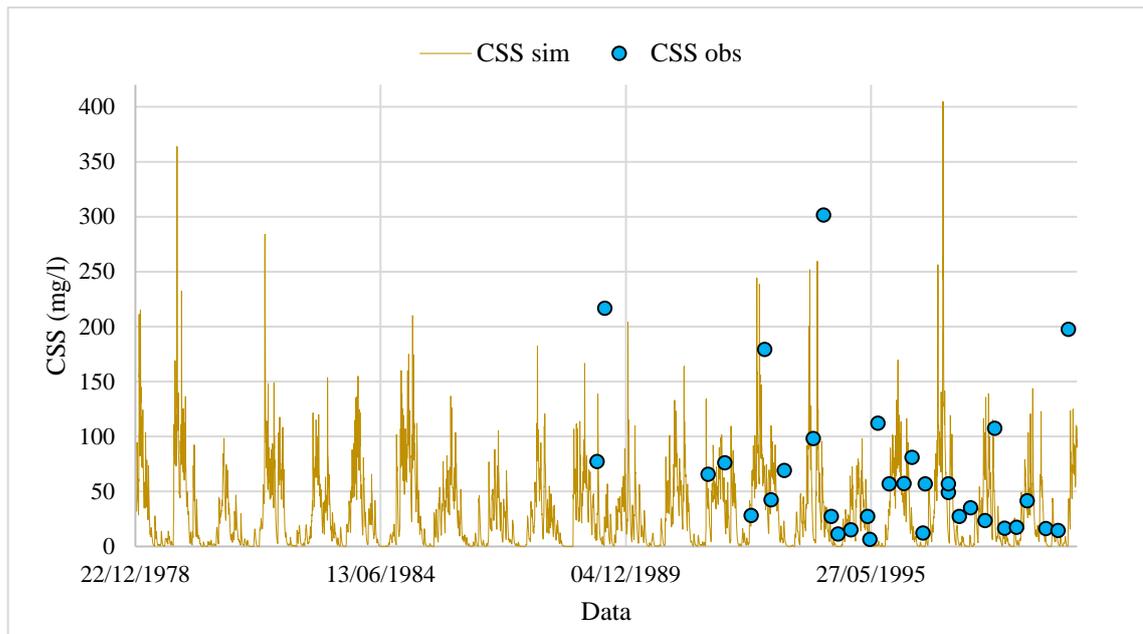


Figura 57 – Concentração de sólidos em suspensão simulada e observada no rio Muriaé no posto Cardozo Moreira (58960000), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED.

A Figura 58 e a Figura 59 apresentam as comparações entre a descarga sólida diária observada e simulada e a concentração de sólidos em suspensão observada e simulada, respectivamente, para o posto Cataguases (58770000), no rio Pomba. Alguns picos de altas concentrações não foram representados pelo modelo, obtendo-se uma melhora visual da representação da descarga sólida, principalmente em valores de base.

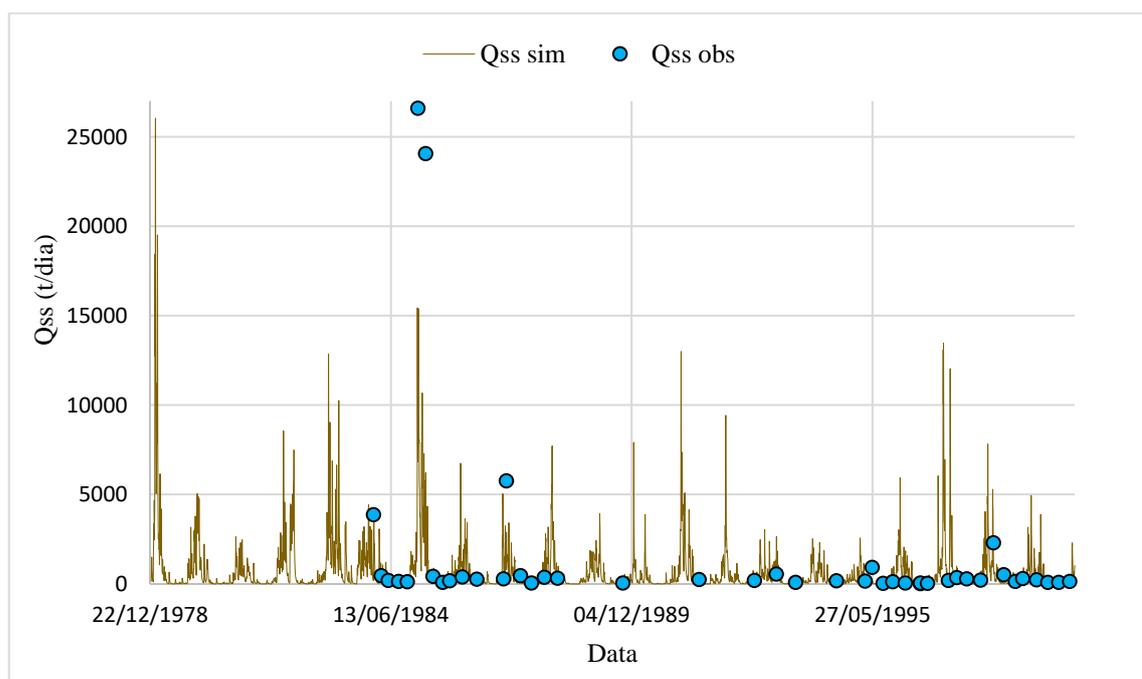
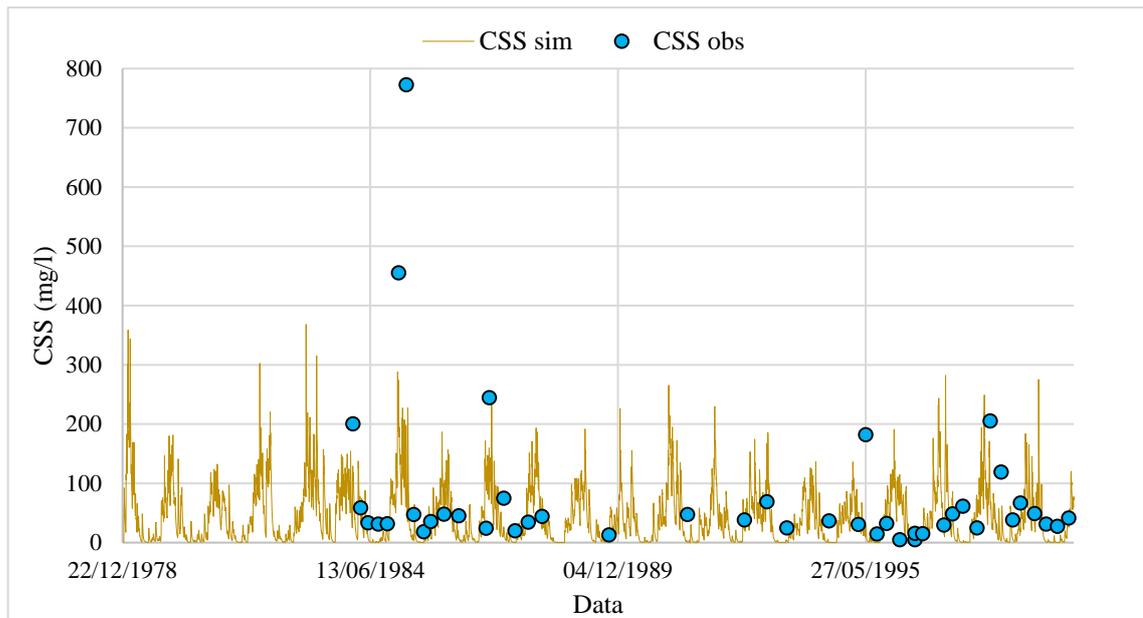
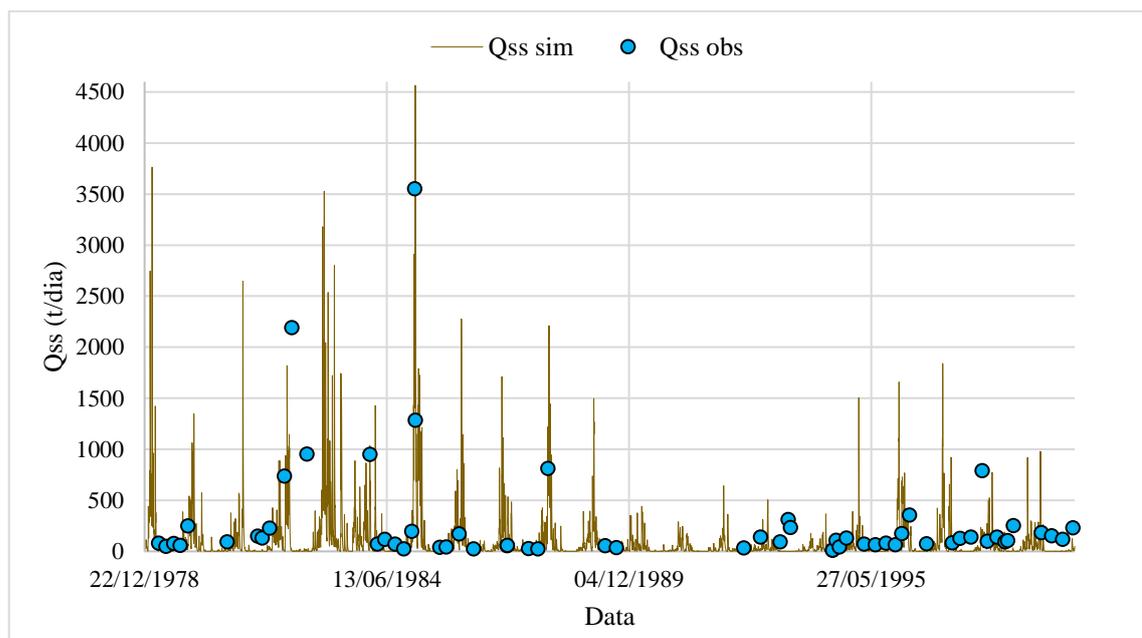


Figura 58 - Descarga sólida simulada e observada no rio Pomba no posto Cataguases (58770000), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED.



*Figura 59 - Concentração de sólidos em suspensão simulada e observada no rio Pomba no posto Cataguases (58770000), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED.*

A Figura 60 e a Figura 61 apresentam as comparações entre a descarga sólida diária observada e simulada e a concentração de sólidos em suspensão observada e simulada, respectivamente, para o posto juiz de fora – Jusante (58480500), no rio Paraíba. Os menores valores observados da concentração de sedimentos em suspensão não foram bem representados pelo modelo, mas houve bastante melhora visual da representação da dinâmica de sedimentos da região em termos de descarga sólida.



*Figura 60 - Descarga sólida simulada e observada no rio Paraíba no posto juiz de fora – Jusante (58480500), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED*

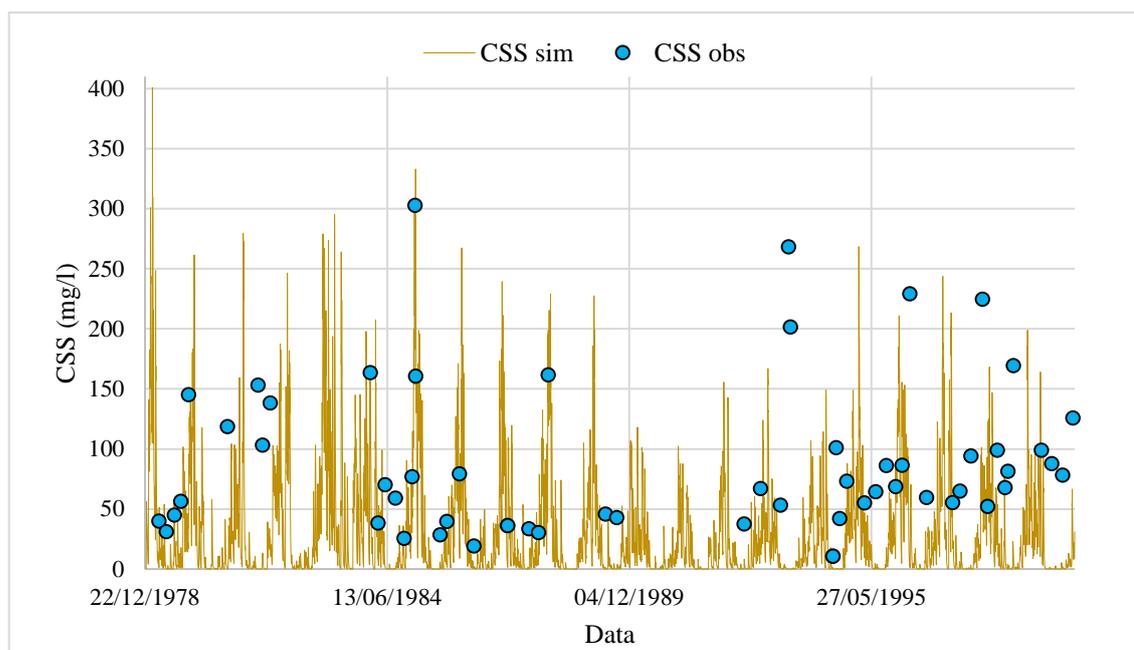


Figura 61 - Concentração de sólidos em suspensão simulada e observada no rio Paraíba no posto juiz de fora – Jusante (58480500), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED.

### 5.2.2.3 Correlação com a Reflectância da Banda do Vermelho

A seguir são apresentados os resultados da análise hidrossedimentológica da bacia a partir da correlação com os dados de CSS simulados pelo modelo e a reflectância da superfície na banda do vermelho (0,64 – 0,67  $\mu\text{m}$ ), no período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED. A Tabela 16 apresenta os valores da correlação de Pearson para os oito pontos virtuais de extração de dados estipulados anteriormente. A Figura 62 apresenta as espacializações dos dados em mapa com faixas de cores de acordo com os intervalos de eficiência do modelo, para a correlação de Pearson, definidos anteriormente.

Tabela 16 - Índice de correlação de Pearson entre a CSS simulada e a reflectância da banda espectral da faixa do vermelho dos satélites Landsat nos pontos de extração de dados selecionados para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED.

Código	Descrição	r
58974000	Posto Campos – Ponte Municipal - 58974000 - Rio Paraíba do Sul	0,71
58630002	Posto Anta G - 58630002 - Rio Paraíba do Sul	0,57
58960000	Posto Cardoso Moreira RV - 58960000 - Rio Muriaré	0,66
P1	Ponto próximo ao encontro do Rio Paraíba do Sul com o Oceano	0,76
P3	Ponto representativo da Confluência do Rio Paraíba do Sul com o Rio Dois Rios	0,75
P2	Ponto representativo da Confluência do Rio Paraíba do Sul com o Rio Muriaré	0,69

Código	Descrição	r
P4	Ponto representativo da Confluência do Rio Paraíba do Sul com o Rio Pomba	0,70
P5	Ponto representativo da Confluência do Rio Paraíba do Sul com o Rio Preto	0,62

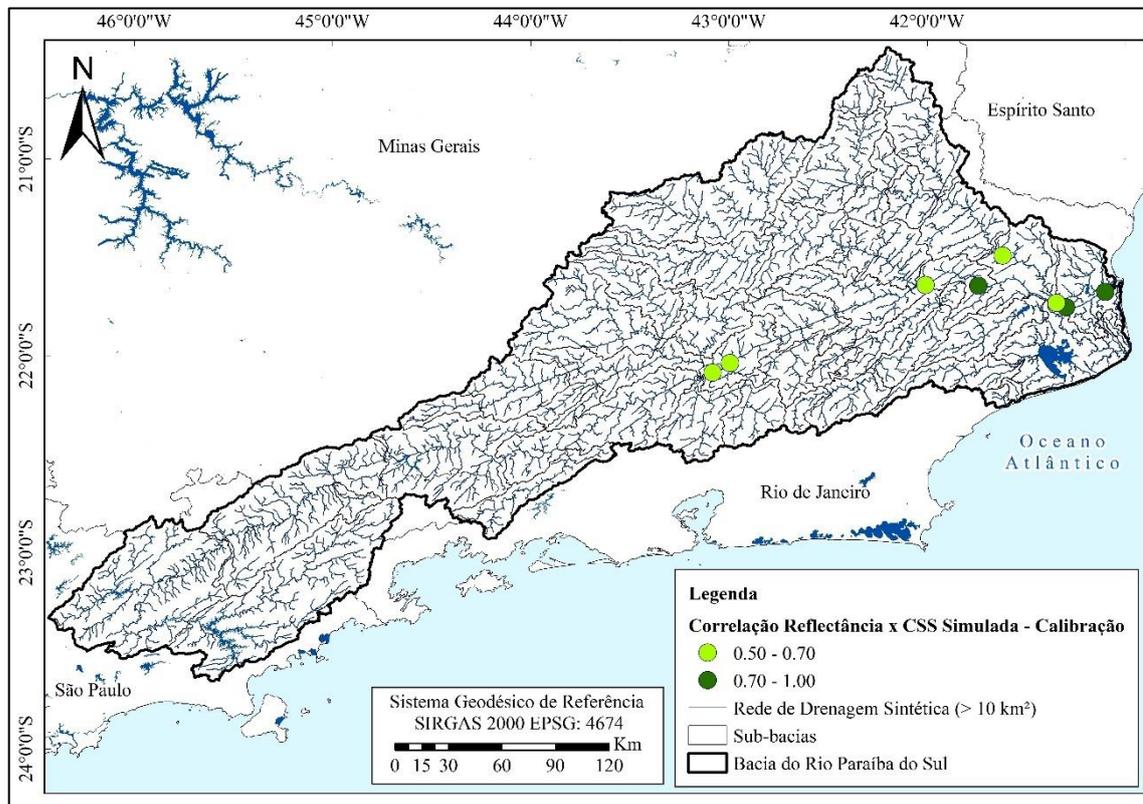
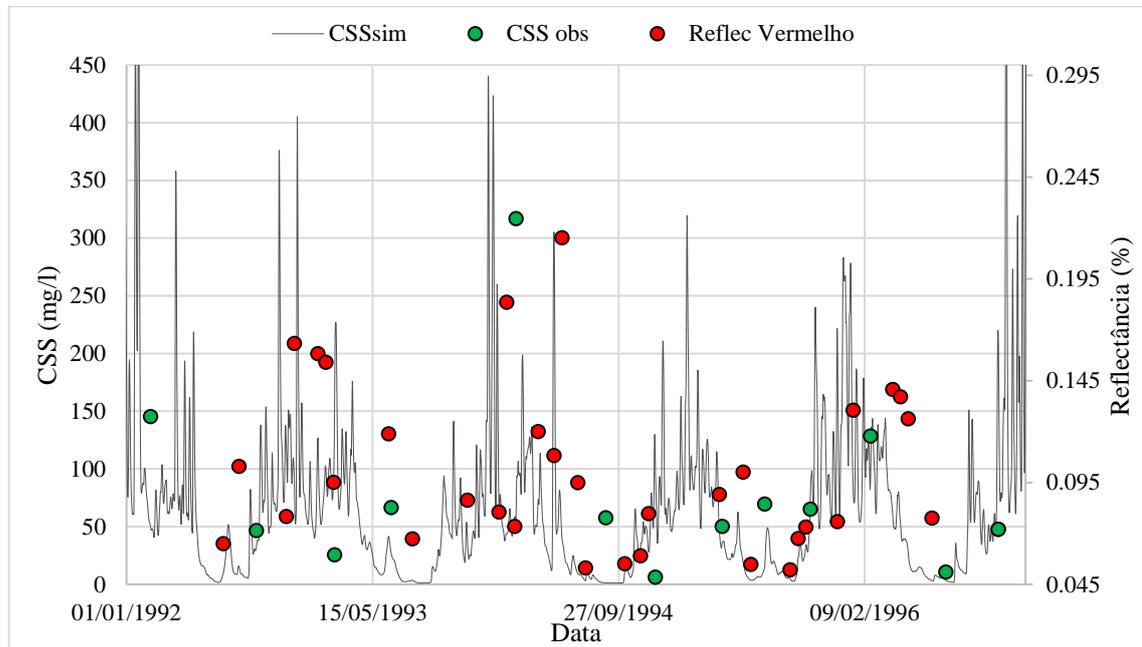


Figura 62 - Espacialização dos resultados do coeficiente de correlação de Pearson nos pontos de extração de dados selecionados para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED.

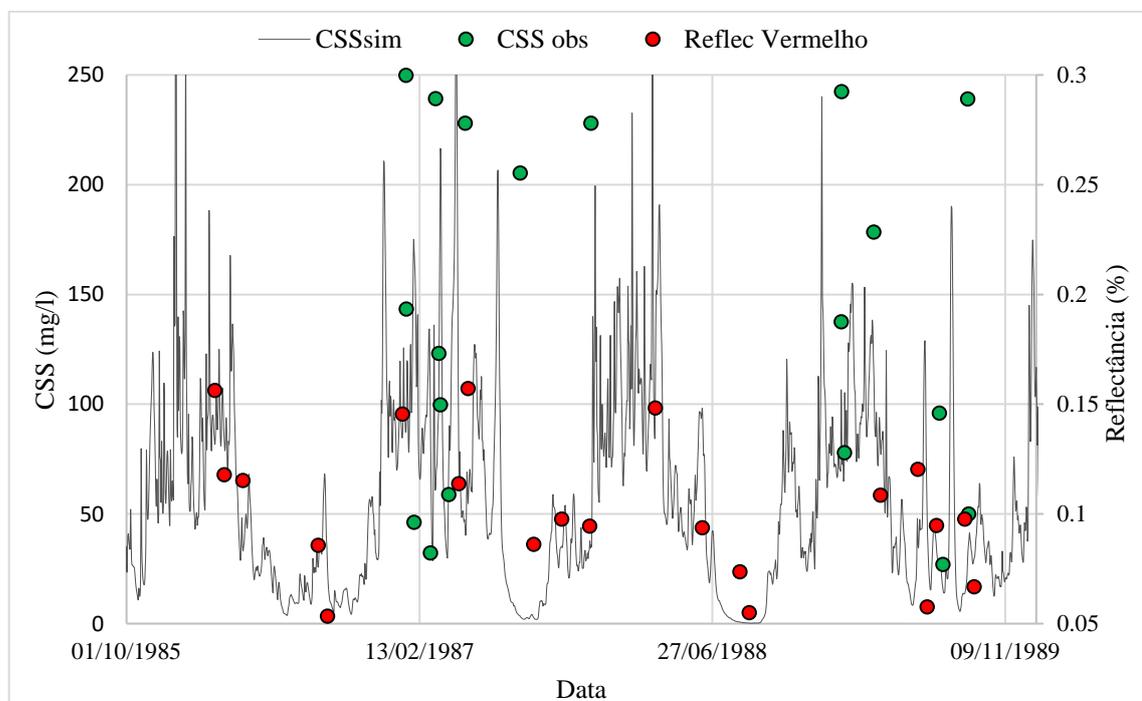
Analisando os dados e a figura é possível perceber a grande correlação obtida entre as simulações e os dados obtidos de produtos de sensoriamento remoto. As correlações apresentaram valores acima de 0,60 em sete dos oito pontos amostrais chegando ao valor de 0,76 no ponto mais a jusante do rio Paraíba do Sul, próximo ao oceano. Mesmo o ponto virtual respectivo ao posto de medição Cardoso Moreira (58960000), no rio Muriaé, onde a largura do rio é de apenas 80 metros, apresentou valor satisfatórios, indicando que a influência dos *pixels* vizinhos de solo não foi suficiente para invalidar a amostragem de *pixels* de água nesse ponto.

As correlações apresentadas nos pontos de amostragem respectivos aos locais com medições de sedimentos apresentaram-se mais altas do que com os próprios dados medidos. A Figura 63, a Figura 64 e a Figura 65 apresentam gráficos da simulação do período de calibração do modelo MGB-SED comparando a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho

e os dados de CSS simulados e observados para os postos Campos – Ponte Municipal (58974000), Anta G (58630002), ambos no rio Paraíba do Sul, e Cardoso Moreira (58960000) no rio Muriaé.



**Figura 63 - Comparativo entre a CSS simulada, a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho e os dados observados de sedimentos para o ponto virtual referente ao posto 58974000 no rio Paraíba do Sul, no período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED.**



**Figura 64 - Comparativo entre a CSS simulada, a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho e os dados observados de sedimentos para o ponto virtual referente ao posto 58630002 no rio Paraíba do Sul, no período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED.**

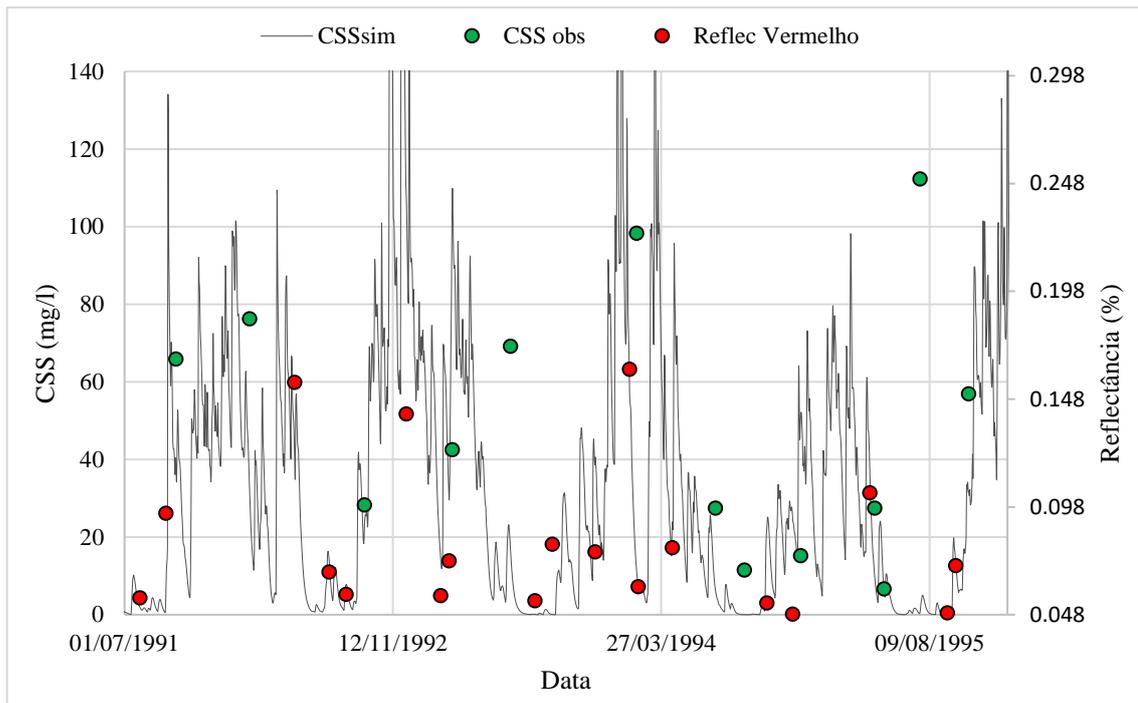


Figura 65 - Comparativo entre a CSS simulada, a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho e os dados observados de sedimentos para o ponto virtual referente ao posto 58960000 no rio Muriaé, no período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED.

Analisando os dados é perceptível o incremento de reflectância nos pontos de maior concentração simulada o que indica que o modelo é capaz de representar as oscilações naturais da dinâmica de sedimentos da bacia do rio Paraíba do Sul. A Figura 66 indica um comparativo entre a correlação de Pearson da CSS simulada comparada aos dados da reflectância e aos dados observados indicando a maior correlação como os dados dos satélites citada.

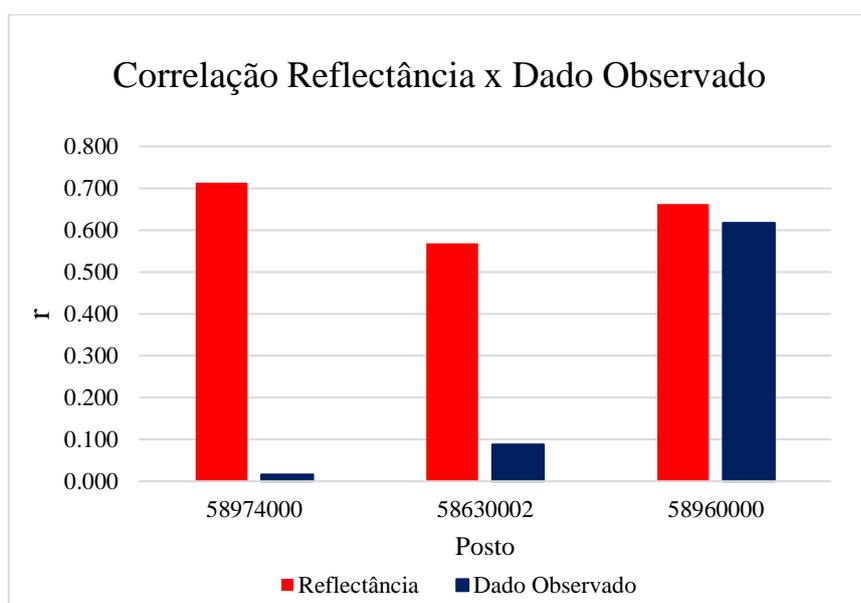


Figura 66 - Comparativo entre a correlação da CSS simulada com os dados medidos e os dados extraídos das imagens de satélite para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED.

A Figura 67 apresenta a correlação dos dados obtidos dos satélites com as simulações para todo o período de calibração no ponto 3, que apresentou correlação de 0,75, evidenciando mais ainda a forte correlação entre os dados simulados e extraídos dos satélites para o período de calibração. Os gráficos comparação dos resultados dos 8 pontos amostrados se encontram no Apêndice V.

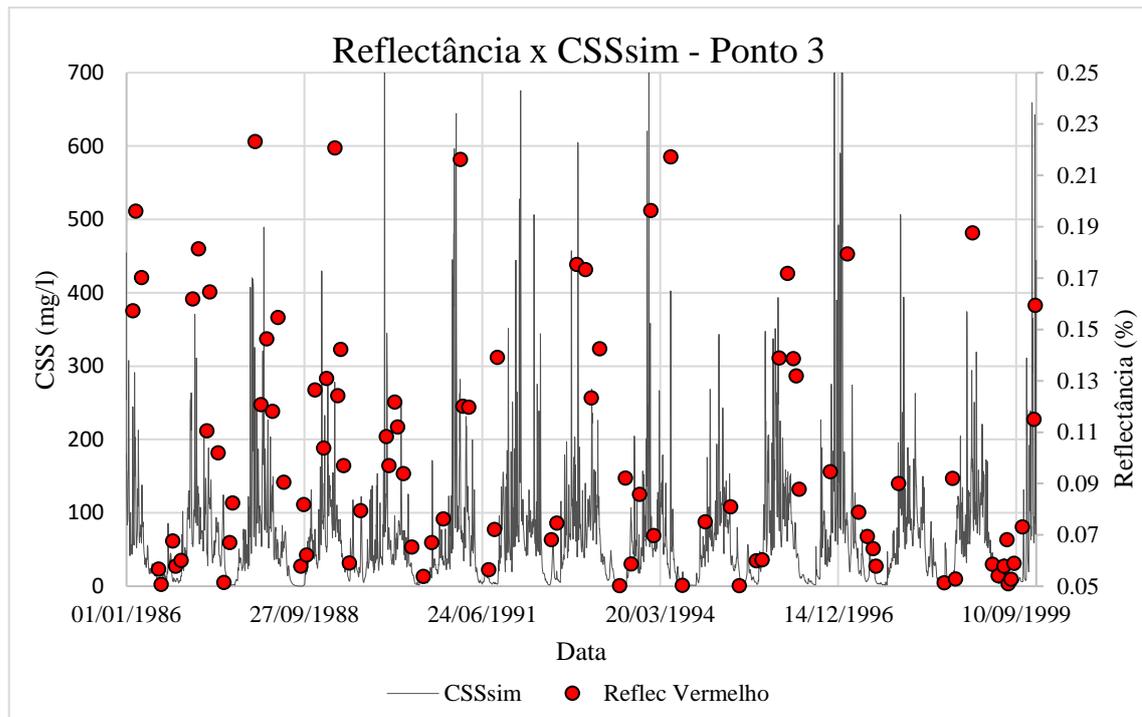


Figura 67 - Comparativo entre a CSS simulada e a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho no Ponto 3 de extração de dados para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED.

A Figura 68 apresenta os gráficos de correlação da CCS simulada e a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho dos oito pontos extraídos. É possível perceber que as maiores concentrações simuladas com dias válidos de dados não ultrapassaram 350 mg/L. Isso pode ser devido ao fato de que a rotina de extração de dados não considera dias com nuvens e sabendo que em dias chuvosos a concentração de sedimento nos rios aumenta, talvez a presença de nuvens no céu tenha impedido a aquisição dos dados de maior concentração de sedimentos. Na figura é possível perceber que a maior densidade de dados obtidos se encontra em baixas concentrações simuladas.

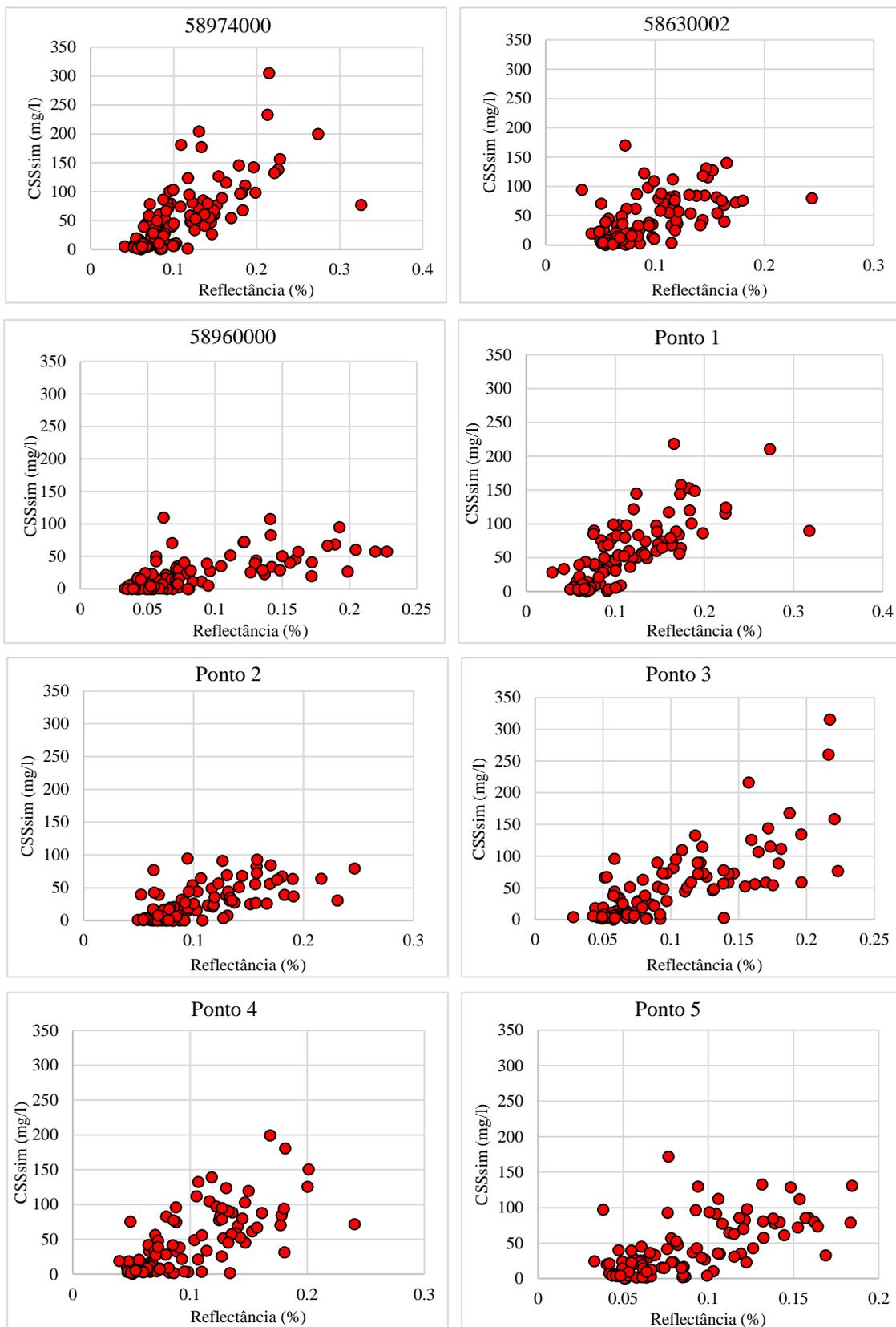


Figura 68 – Gráficos da correlação entre a CSS simulada e a refletância da banda do vermelho para todos os pontos de extração de dados no período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED.

### 5.2.3 Resultados da Validação

Nos próximos itens são descritos e apresentados os resultados referentes a descarga sólida (Qss) e às concentrações de sedimentos em suspensão (CSS), simuladas a partir do modelo de sedimentos MGB-SED, para o mesmo período de validação do modelo hidrológico MGB-IPH, representado entre 02/01/2000 e 31/12/2010.

#### 5.2.3.1 Métricas de Desempenho

A Tabela 15, apresenta os postos sedimentométricos utilizados na validação do modelo, seu código e rio e as métricas de desempenho de Nash-sutcliffe, erro de volume e correlação de Pearson para a descarga sólida diária e a concentração de sólidos em suspensão, simuladas pelo modelo. Os resultados do modelo também foram representados em mapas contendo a sua localização espacial na bacia em faixas de cores referentes aos intervalos de classificação dos resultados em muito bons, bons, satisfatórios e insatisfatórios, descritos anteriormente, para a descarga sólida de sedimentos finos diária simulada pelo modelo.

*Tabela 17 - Métricas de desempenho para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED considerando a Descarga Sólida (Qss) e concentração de sedimentos em suspensão (CSS).*

Qss				
CÓDIGO	RIO	NASH	$\Delta V$	r
58974000	RIO PARAÍBA DO SUL	-1,93	45,288	0,721
58960000	RIO MURIAÉ	-2,826	38,062	0,225
58480500	RIO PARAÍBUNA	0,256	-46,344	0,272
58770000	RIO POMBA	0,339	94,609	0,921
58790002	RIO POMBA	-2,15	77,602	0,689
CSS				
CÓDIGO	RIO	NASH	$\Delta V$	r
58974000	RIO PARAÍBA DO SUL	-1,616	-12,389	0,262
58960000	RIO MURIAÉ	-0,208	-39,562	0,028
58480500	RIO PARAÍBUNA	0,271	-65,407	0,094
58770000	RIO POMBA	-0,101	-9,931	-0,087
58790002	RIO POMBA	-0,523	-6,436	0,499

Ao analisar a tabela percebe-se que os valores e Nash-Sutcliffe para a concentração de sólidos em suspensão se apresentaram em maioria insatisfatórios, com exceção do posto Juiz de Fora – Jusante (58480500), que apresentou valor considerando bom. Os erros de volume,

para CSS, apresentaram valores considerados muito bons para os postos Cataguases (58770000), Campos – Ponte Municipal (58974000) e Santo Antônio de Pádua II (58790002), bom para o posto Cardoso Moreira (5896000) e satisfatório para o posto Juiz de Fora – Jusante (58480500). Esses resultados podem ser considerados bastante promissores se tratando da concentração de sedimentos em suspensão simulada.

Os resultados de NASH para a descarga sólida do período de validação do modelo apresentaram piora nos valores, frente à comparação com o período de calibração. O coeficiente de correlação de Pearson apresentou três postos com dados insatisfatórios, Campos – Ponte Municipal (58974000), Cardoso Moreira (5896000) e Santo Antônio de Pádua II (58790002). Para o valor de erro de volume o modelo apresentou dois postos com dados insatisfatórios, Cataguases (58770000) e Santo Antônio de Pádua II (58790002), ambos no rio Pomba. Em contrapartida os mesmos postos apresentam índices de correlação satisfatórios. A Figura 69 apresenta um histograma de frequência que descreve a quantidade de estações com resultados enquadrados em cada classe de performance do modelo para as diferentes métricas utilizadas.

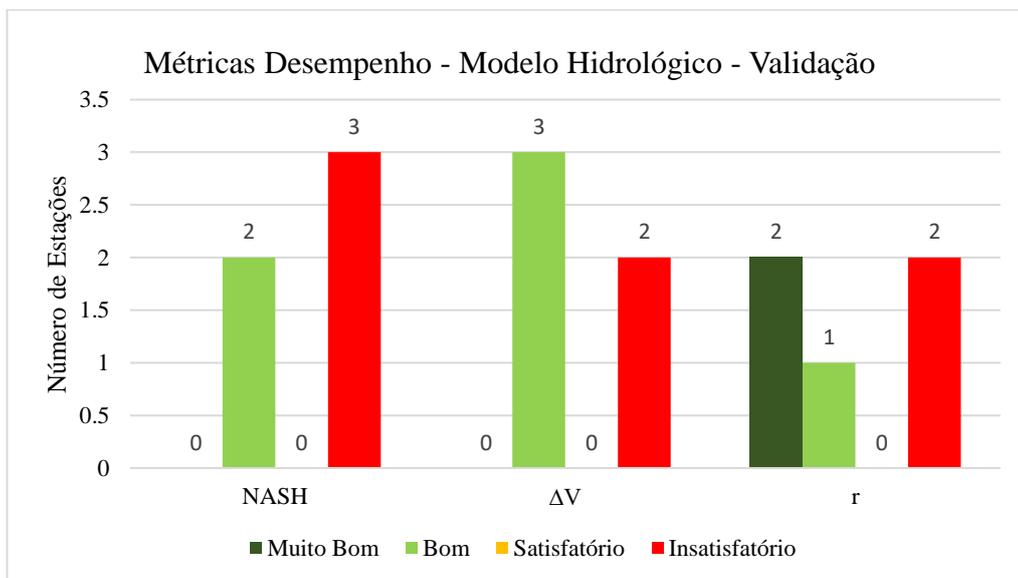


Figura 69 - Histograma de frequência da quantidade de estações para cada classe de performance de cada métrica de desempenho do período de validação do modelo de Sedimentos MGB-SED.

Analisando os dados obtidos através do período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED percebeu-se uma piora significativa nas métricas de desempenho de Nash-Sutcliffe e erros de volume. Em contrapartida o modelo ainda foi capaz de gerar resultados bons em todas as métricas e altos índices de correlação para os postos Campos – Ponte Municipal (58974000) e Cataguases (58770000).

A Figura 70, a Figura 71 e a Figura 72 apresentam a espacialização das faixas de valores para as métricas de desempenho de Nash-Sutcliffe, erro de volume e o índice de correlação de Pearson, respectivamente. o ponto cinza nas imagens representa o posto Anta G (58630002) que não foi considerado na validação do modelo de sedimentos por não haver disponibilidade de dados no período.

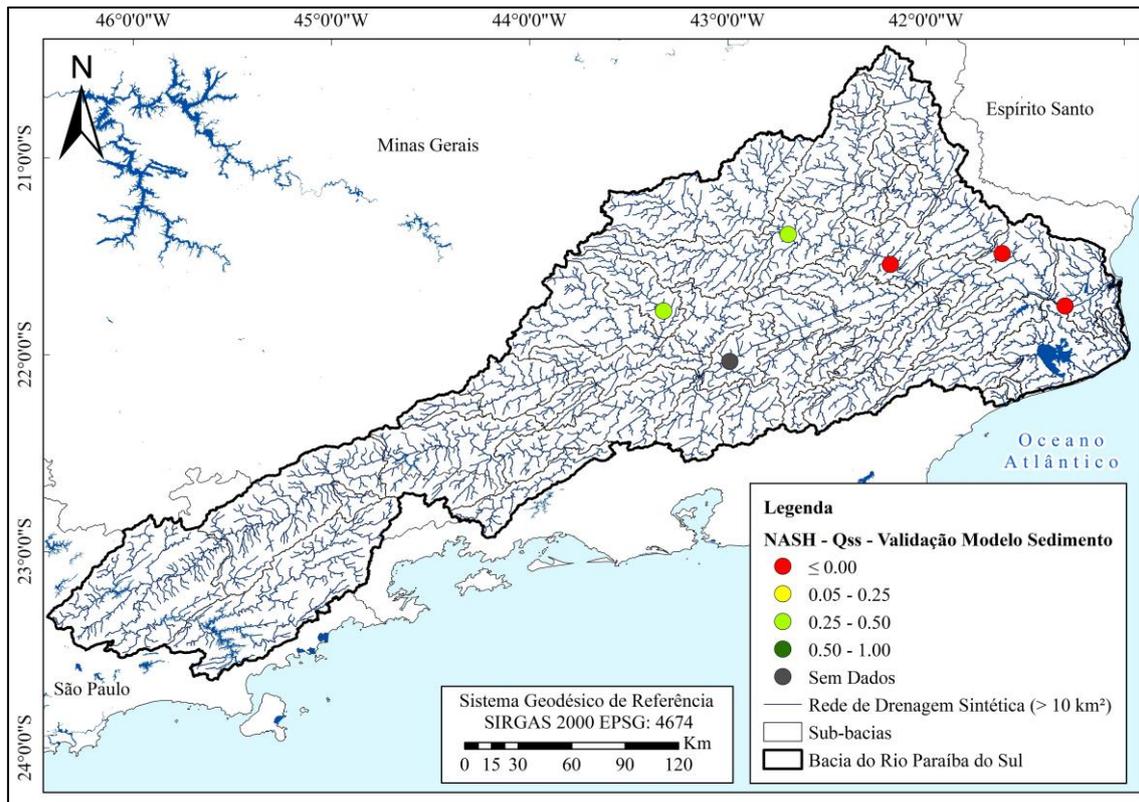


Figura 70 - Espacialização dos resultados de Nash sutcliffe para a Qss gerada pelo modelo MGB-SED para o período de validação.

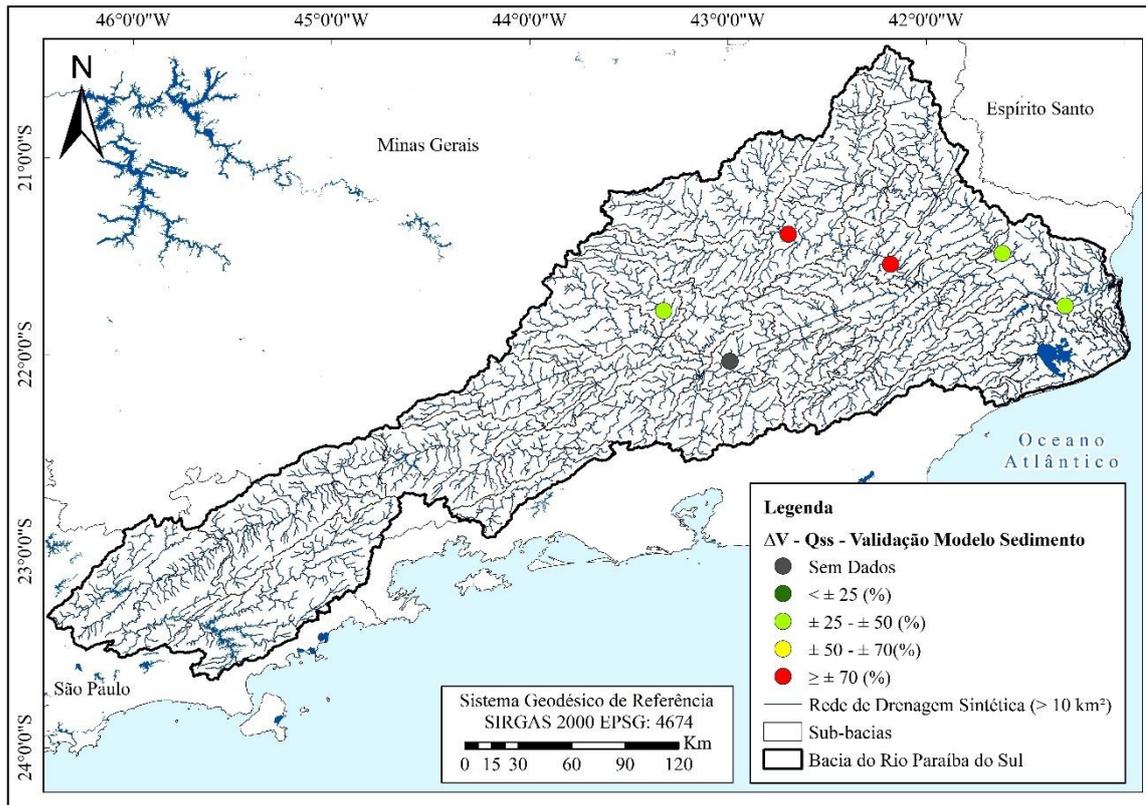


Figura 71 - Espacialização dos resultados do erro de volume para a Qss gerada pelo modelo MGB-SED para o período de validação.

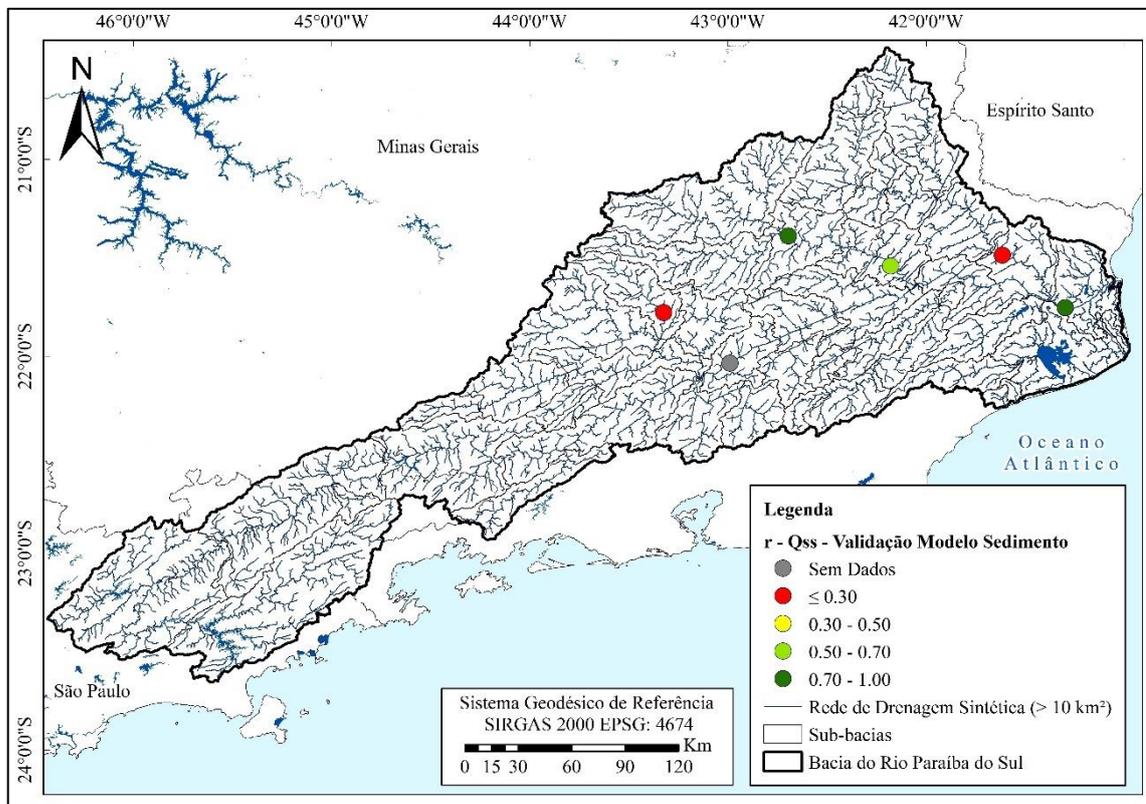
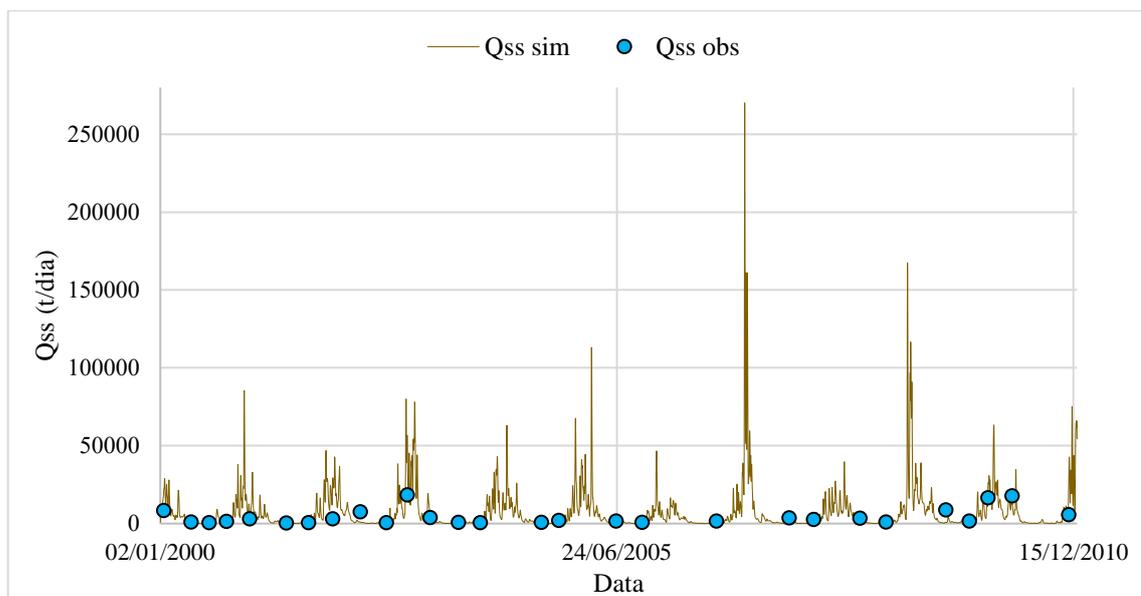


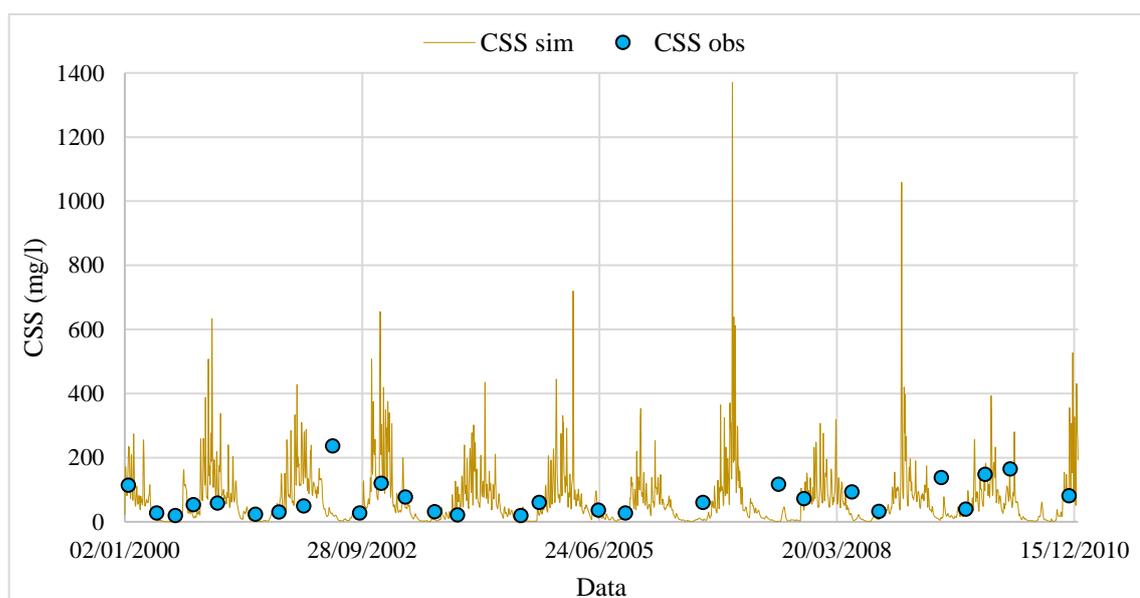
Figura 72 - Espacialização dos resultados da correlação de Pearson para a Qss gerada pelo modelo MGB-SED para o período de validação.

### 5.2.3.2 Sedimentogramas

A seguir são apresentados os sedimentogramas referentes à descarga sólida e a concentração de sólidos em suspensão, simuladas a partir do modelo de sedimentos para o período de validação em todos os postos selecionados com disponibilidade de dados do período. A Figura 73 e a Figura 74 a apresentam as comparações entre a descarga sólida diária observada e simulada e a concentração de sólidos em suspensão observada e simulada, respectivamente, para o posto Campos – Ponte Municipal (58974000), no rio Paraíba do Sul.



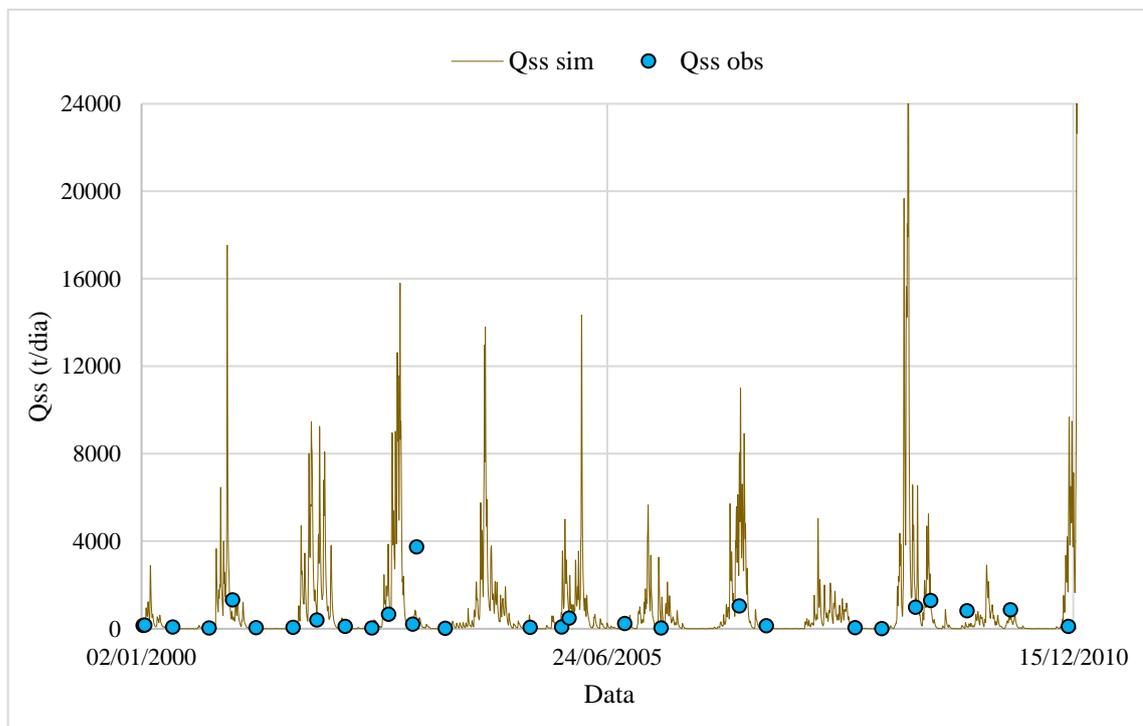
**Figura 73 - Descarga sólida simulada e observada no rio Paraíba do Sul no posto Campos - Ponte Municipal (58974000), para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED.**



**Figura 74 – Concentração de sólidos em suspensão simulada e observada no rio Paraíba do Sul no posto Campos - Ponte Municipal (58974000), para o período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED.**

Diferente do período de validação dos resultados o posto Campos – Ponte Municipal (58974000) apresentou concentrações de sedimentos observadas mais baixas do que no período de calibração. As métricas de desempenho para o posto apresentaram piora, mas a partir da análise visual dos dados, há concordância entre os dados simulados e observados tanto para descarga sólida quanto para a CSS. Alguns picos simulados não foram capazes de ser analisados a partir dos dados medidos.

A Figura 75 e a Figura 76 apresentam as comparações entre a descarga sólida diária observada e simulada e a concentração de sólidos em suspensão observada e simulada, respectivamente, para o posto Cardozo Moreira (58960000), no rio Muriaé. Esse posto também apresentou piora nas métricas de desempenho do período de calibração para o período de validação, porém a análise visual também indica elevada concordância entre os dados, principalmente para a concentra de sedimentos finis em suspensão.



*Figura 75 - Descarga sólida simulada e observada no rio Muriaé no posto Cardozo Moreira (58960000), para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED.*

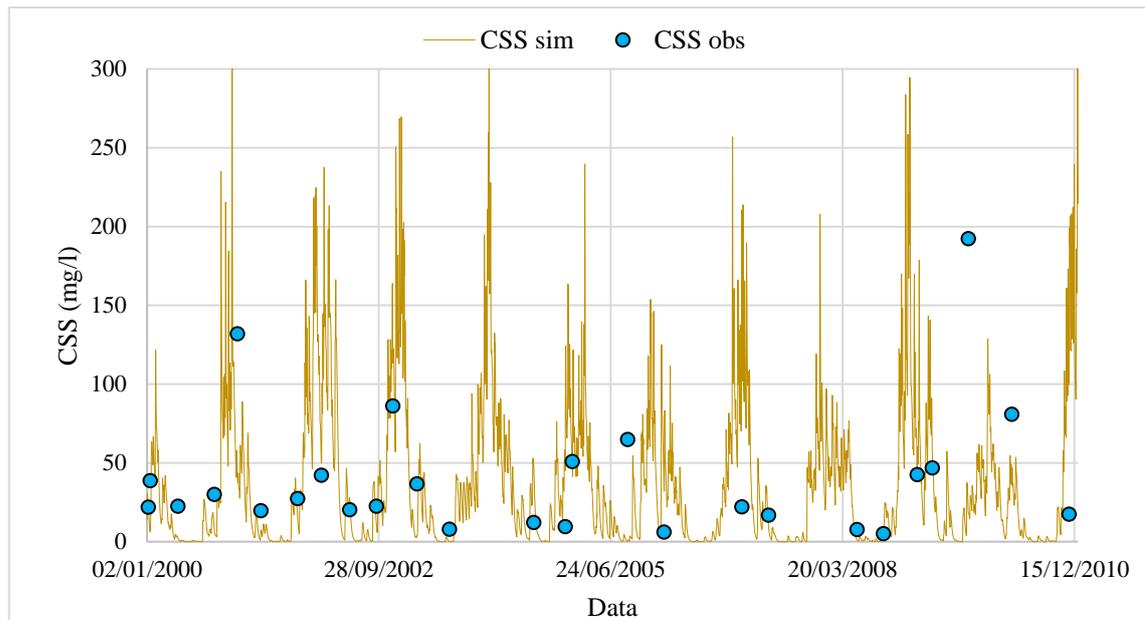


Figura 76 - Concentração de sólidos em suspensão simulada e observada no rio Muriaé no posto Cardozo Moreira (58960000), para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED.

A Figura 77 e a Figura 78 apresentam as comparações entre a descarga sólida diária observada e simulada e a concentração de sólidos em suspensão observada e simulada, respectivamente, para o posto Cataguases (58770000), no rio Pomba. A análise visual indica que os dados apresentam coerência tanto para a descarga sólida quanto para a CSS. A magnitude dos picos de concentração medidos e simulados apresenta valores similares, e torno de 250 mg/L. Não foi possível observar os picos de descarga sólida com os dados observados.

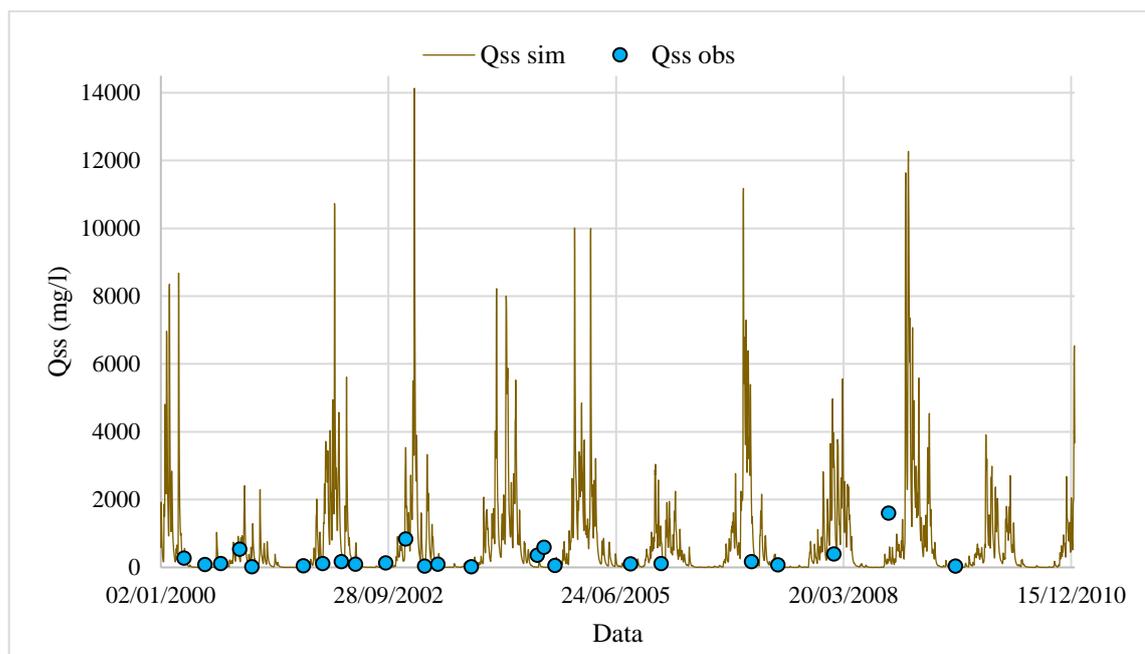


Figura 77 - Descarga sólida simulada e observada no rio Pomba no posto Cataguases (58770000), para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED.

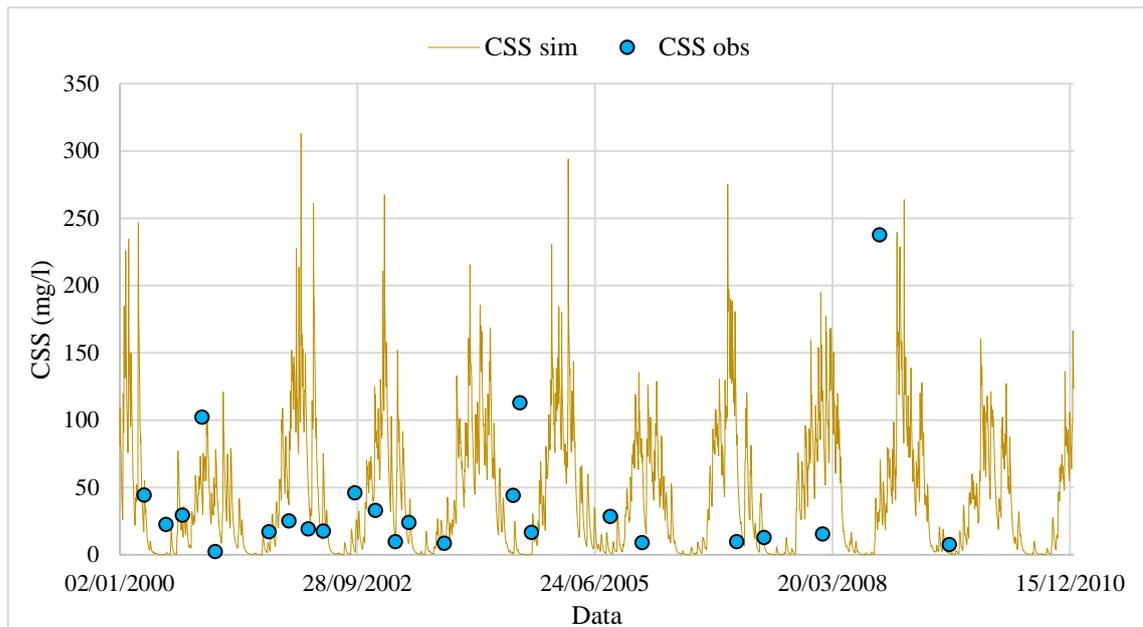


Figura 78 - Concentração de sólidos em suspensão simulada e observada no rio Pomba no posto Cataguases (58770000), para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED.

A Figura 79 e a Figura 80 apresentam as comparações entre a descarga sólida diária observada e simulada e a concentração de sólidos em suspensão observada e simulada, respectivamente, para o posto juiz de fora – Jusante (58480500), no rio Paraíbuna. Esse posto para o período de validação apresentou valores de NASH considerados bons tanto descarga sólida quanto para CSS. A análise visual dos dados também indica elevada coerência entre os dados.

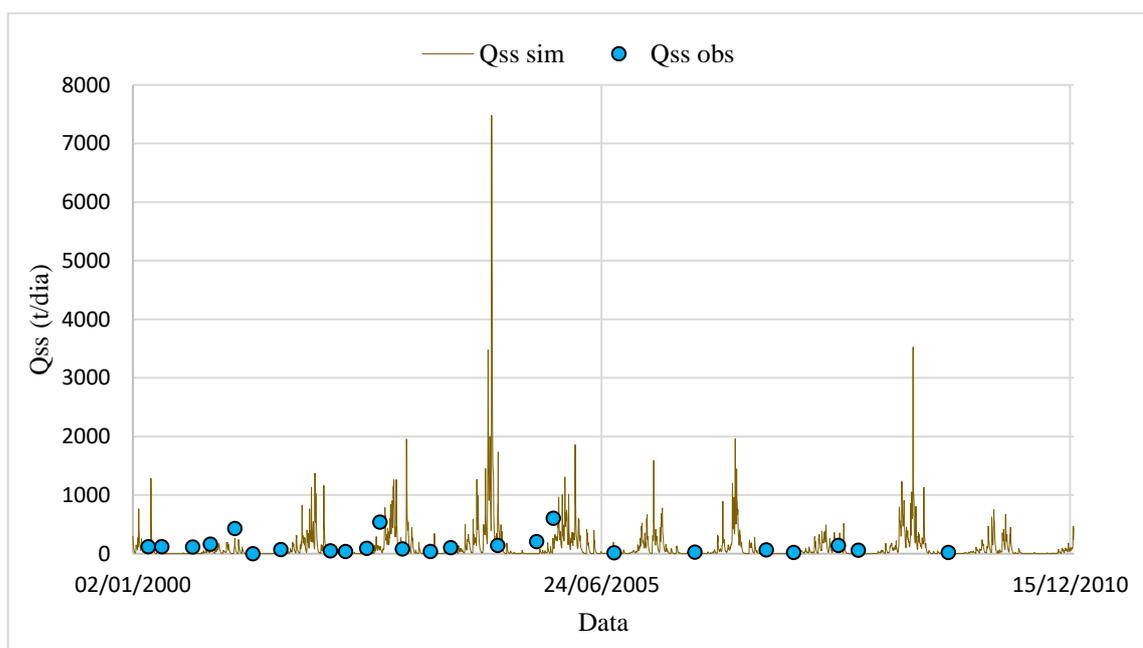


Figura 79 - Descarga sólida simulada e observada no rio Paraíbuna no posto juiz de fora – Jusante (58480500), para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED.

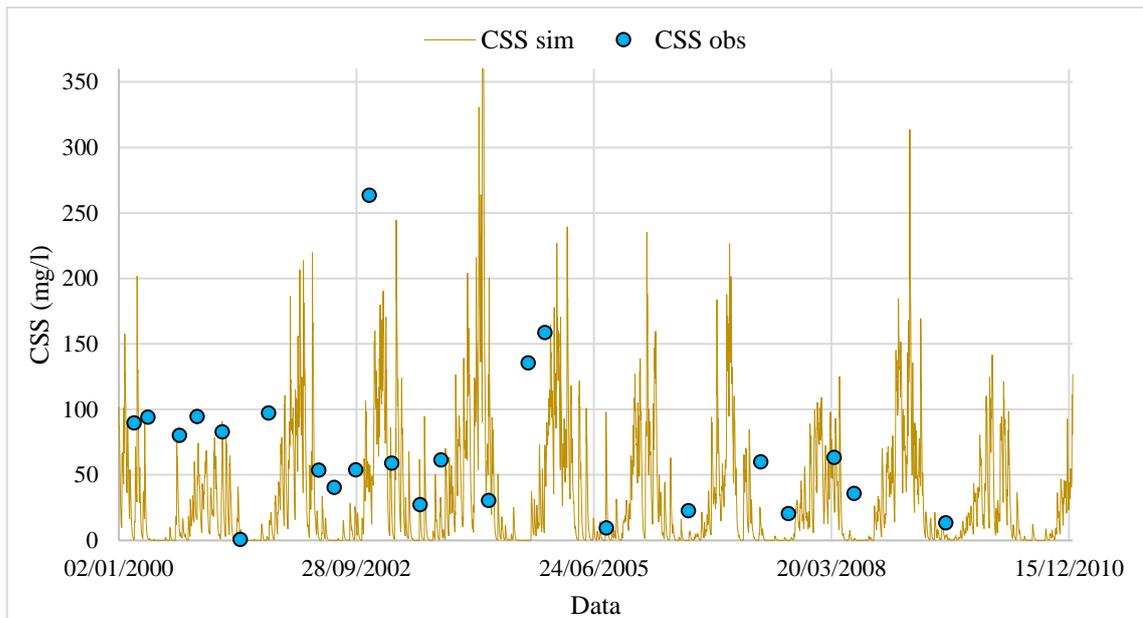


Figura 80 - Concentração de sólidos em suspensão simulada e observada no rio Paraíba no posto juiz de fora – Jusante (58480500), para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED.

A Figura 81 e a Figura 82 apresentam as comparações entre a descarga sólida diária observada e simulada e a concentração de sólidos em suspensão observada e simulada, respectivamente, para o posto Santo Antônio de Pádula II (58720002) no rio Pomba. Esse posto apresentou elevada correlação de Pearson tanto para descarga sólida quanto para concentração de sedimentos em suspensão e a análise visual indica grande semelhança entre os dados simulados e observados.

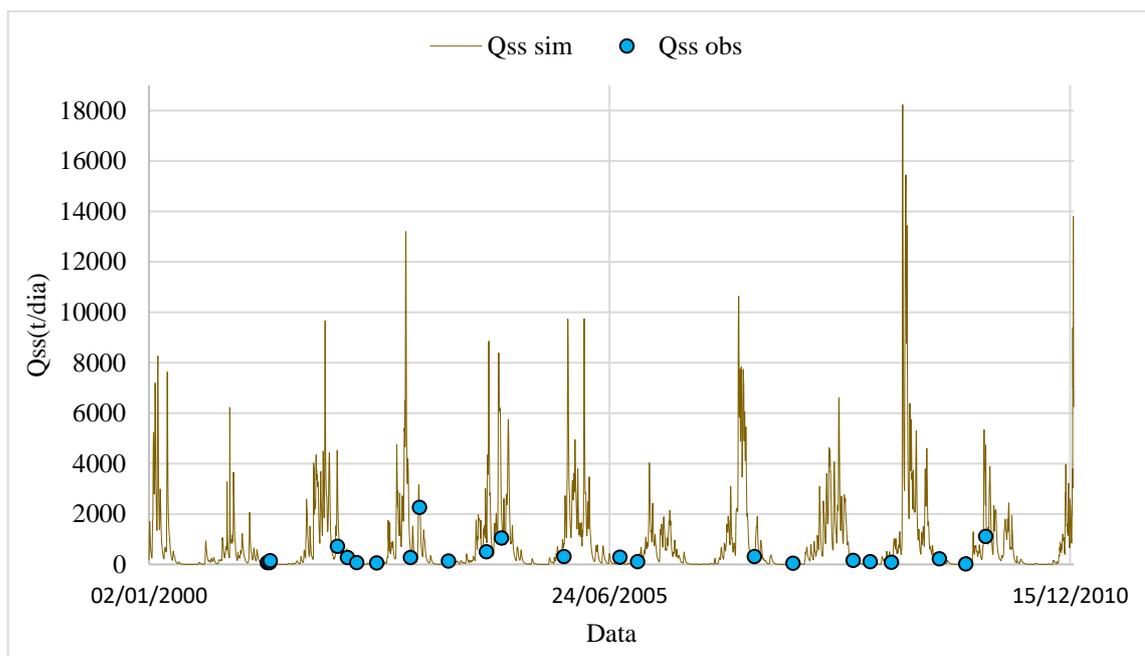


Figura 81 - Descarga sólida simulada e observada no rio Pomba no posto Santo Antônio de Pádula II (58720002), para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED.

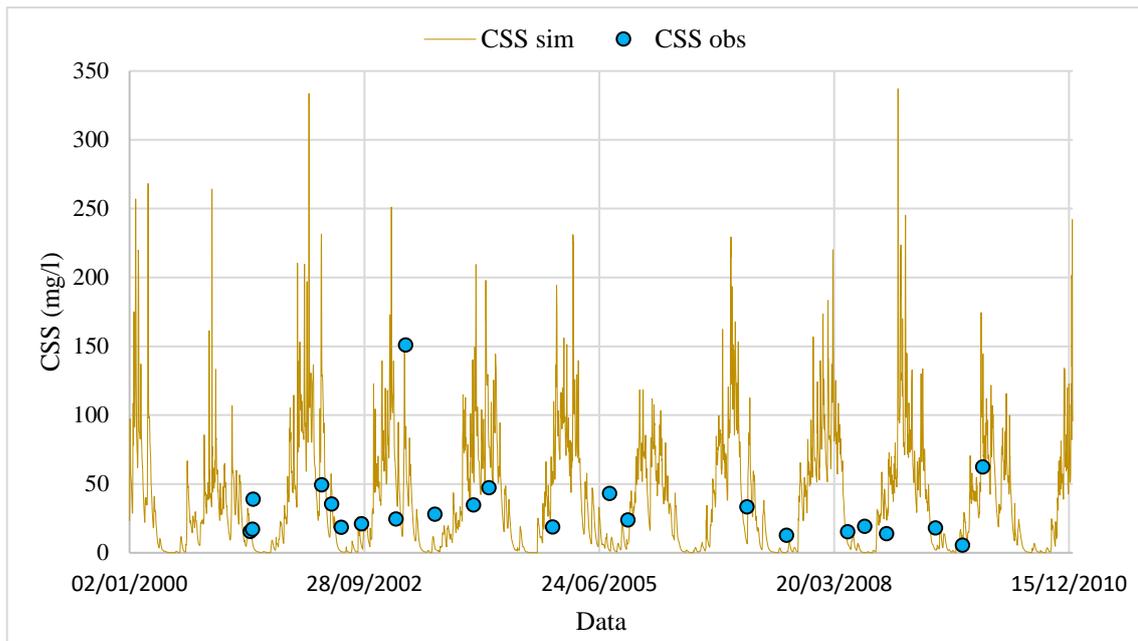


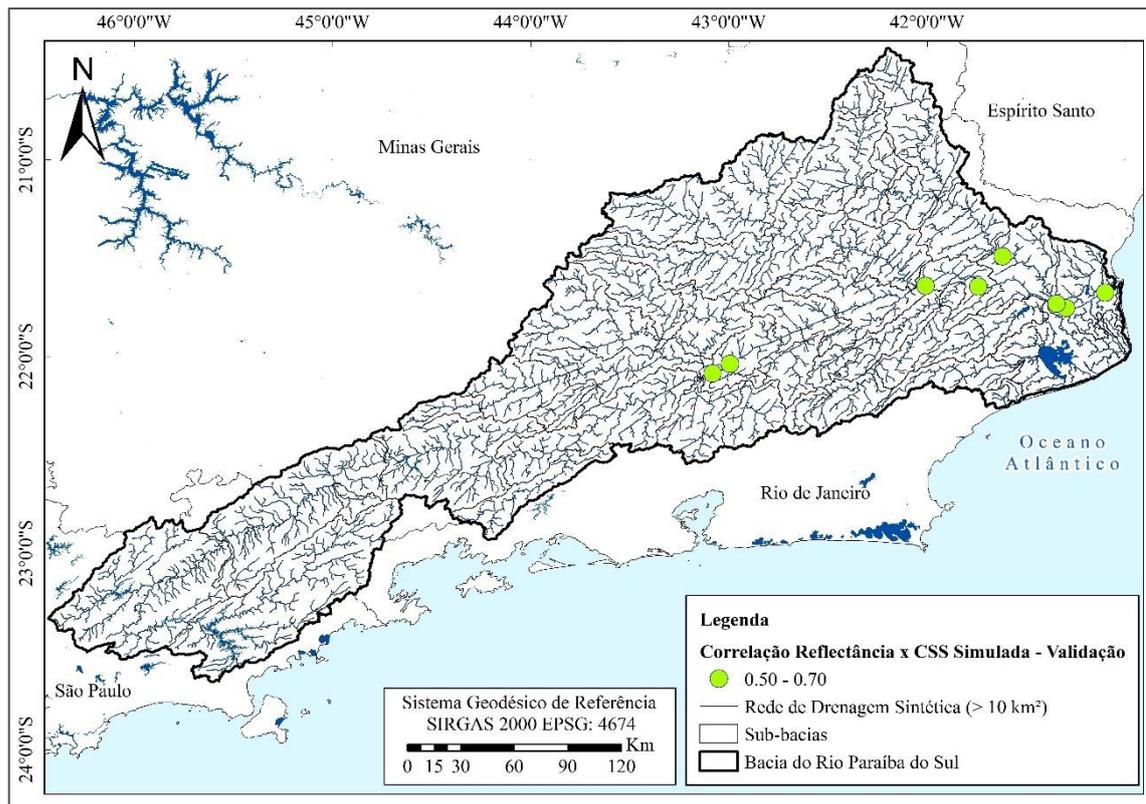
Figura 82 - Concentração de sólidos em suspensão simulada e observada no rio Pomba no posto Santo Antônio de Pádua II (58720002), para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED.

### 5.2.3.3 Correlação com a Reflectância da Banda do Vermelho

A seguir são apresentados os resultados da análise hidrossedimentológica da bacia a partir da correlação com os dados de CSS simulados pelo modelo e a reflectância da superfície na banda do vermelho (0,64 – 0,67  $\mu\text{m}$ ) no período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED. A Tabela 18 apresenta os valores da correlação de Pearson para os oito pontos virtuais de extração de dados estipulados anteriormente. A Figura 83 apresenta as espacializações dos dados em mapa com faixas de cores de acordo com os intervalos de eficiência do modelo, para a correlação de Pearson, definidos.

Tabela 18 - Índice de correlação de Pearson entre a CSS simulada e a reflectância da banda espectral da faixa do vermelho dos satélites Landsat nos pontos de extração de dados selecionados para o período de validação do modelo de sedimentos MB-SED.

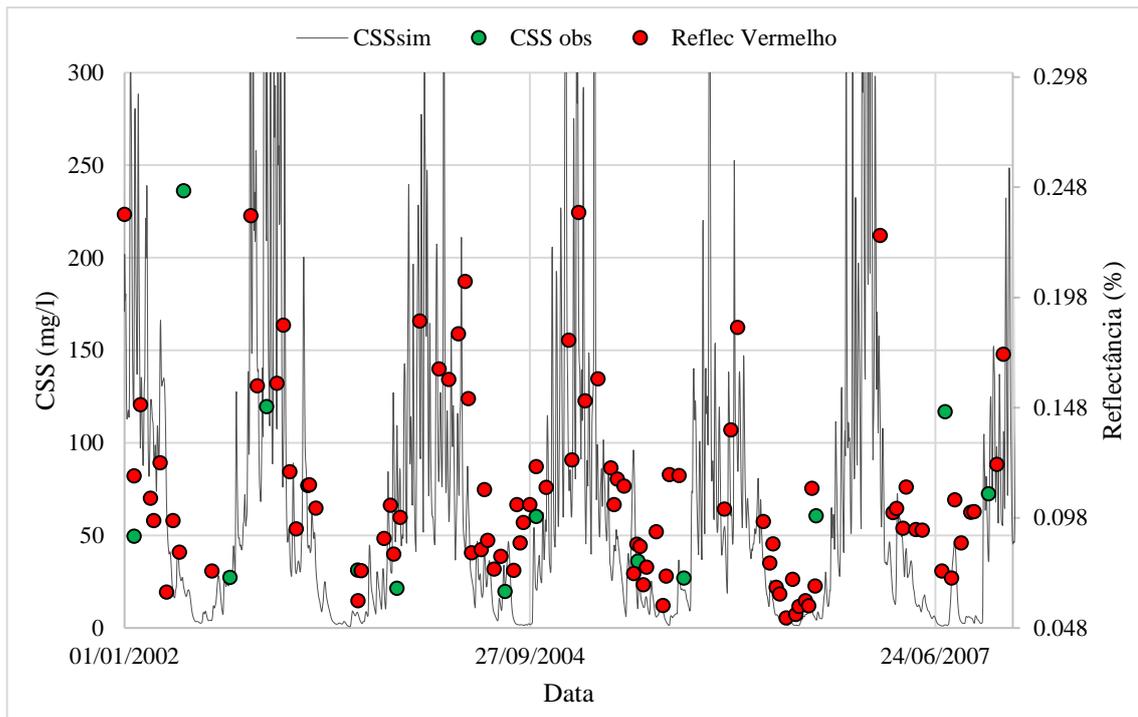
Código	Descrição	r
58974000	Posto Campos – Ponte Municipal - 58974000 - Rio Paraíba do Sul	0,63
58630002	Posto Anta G - 58630002 - Rio Paraíba do Sul	0,54
58960000	Posto Cardoso Moreira RV - 58960000 - Rio Muriaré	0,68
P1	Ponto próximo ao encontro do Rio Paraíba do Sul com o Oceano	0,55
P3	Ponto representativo da Confluência do Rio Paraíba do Sul com o Rio Dois Rios	0,69
P2	Ponto representativo da Confluência do Rio Paraíba do Sul com o Rio Muriaré	0,64
P4	Ponto representativo da Confluência do Rio Paraíba do Sul com o Rio Pomba	0,62
P5	Ponto representativo da Confluência do Rio Paraíba do Sul com o Rio Preto	0,58



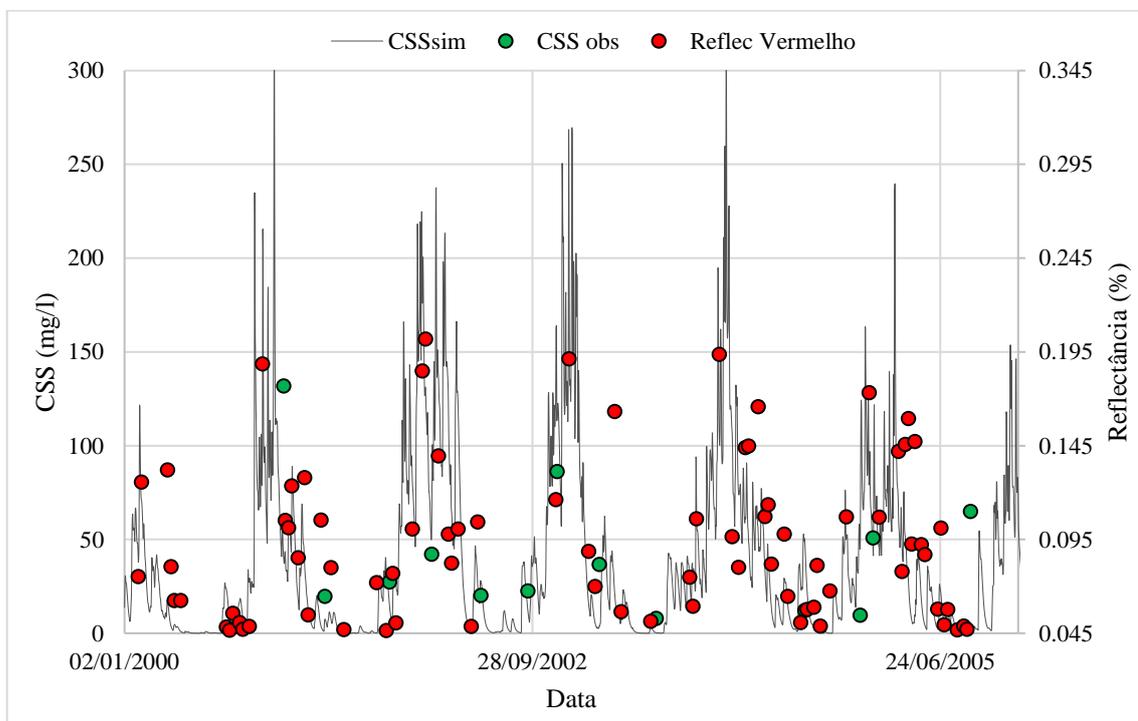
**Figura 83 - Espacialização dos resultados do coeficiente de correlação de Pearson nos pontos de extração de dados selecionados para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED.**

Ao analisar os dados percebe-se que os valores de correlação se mantêm altos apresentando valores acima de 0,6 em cinco dos pontos de extração de dados e um valor máximo de 0,69 no Ponto 3. Notou-se que a correlação entre os dados extraídos e os dados simulados apresentaram redução nos coeficientes de correlação de Pearson do período de calibração para o período de validação das simulações do modelo de sedimentos MGB-SED.

A Figura 84 e a Figura 85 apresentando gráficos da simulação do período de calibração do modelo MGB-SED, comparando a refletância espectral da superfície da banda do vermelho, com os dados de CSS simulados e observados para os pontos respectivos aos postos Campos – Ponte Municipal (58974000), no rio Paraíba do Sul e Cardoso Moreira (58960000), no rio Muriaé. A correlação entre os dados simulados e extraídos do satélite ainda se manteve maior do que com relação aos dados observados de acordo com o comparativo entre os coeficientes de Pearson da Figura 86.



**Figura 84 - Comparativo entre a CSS simulada, a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho e os dados observados de sedimentos para o ponto virtual referente ao posto 58974000 no rio Paraíba do Sul, no período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED.**



**Figura 85 - Comparativo entre a CSS simulada, a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho e os dados observados de sedimentos para o ponto virtual referente ao posto 58960000 no rio Muriaé, no período de calibração do modelo de sedimentos MGB-SED.**

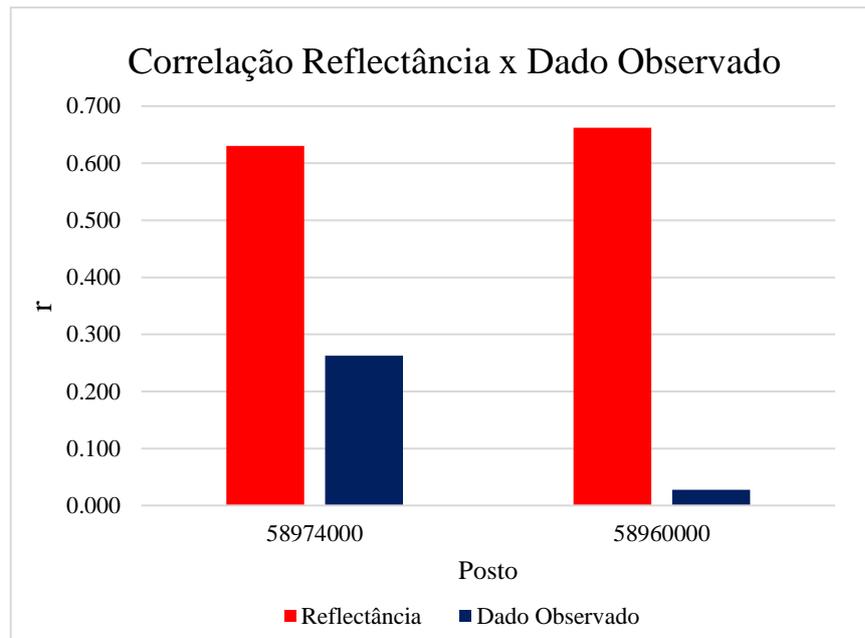


Figura 86 - Comparativo entre a correlação da CSS simulada com os dados medidos e os dados extraídos das imagens de satélite para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED.

A Figura 87 apresenta a correlação dos dados obtidos dos satélites com as simulações para todo o período de calibração no ponto 2, que apresentou correlação de 0,64, evidenciando que a correlação entre os dados simulados e extraídos dos satélites para o período validação também obteve resultados coerentes.

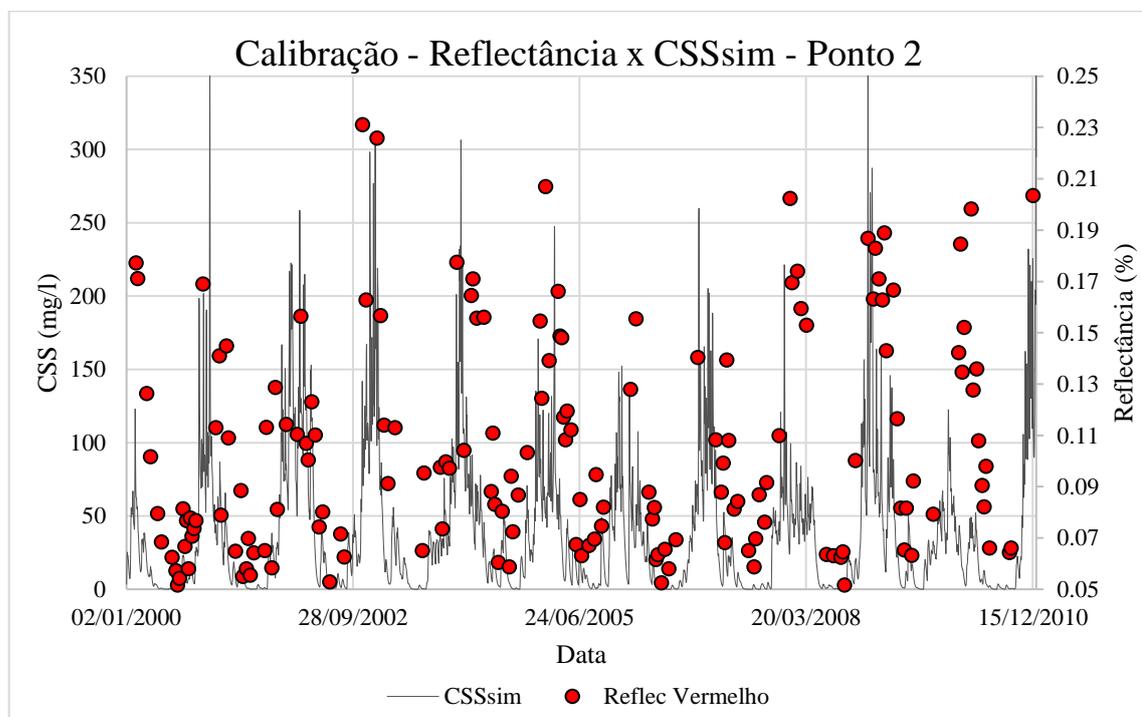


Figura 87 - Comparativo entre a CSS simulada e a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho no Ponto 2 de extração de dados para o período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED.

A Figura 88 apresenta os gráficos de correlação da CSS simulada e a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho para os oito pontos extraídos no período de validação. É possível perceber que alguns pontos aparecem deslocados da linha de tendência de distribuição, como acontece no ponto 1 onde há para uma baixa reflectância uma alta concentração de sedimentos associada, o que pode indicar que a simulação possivelmente superestimou os picos de concentração. Isto pode ocorrer devido à erros nos dados inseridos de entrada nos modelos de chuva ou vazão e também pode ser devido ao aumento no coeficiente  $\beta$  da equação de MUSLE proposto nesse estudo. Em linhas gerais analisar o comportamento da hidrossedimentologia da bacia através dos dados obtidos dos satélites *Landsat* se mostra promissor, permitindo maiores análises espaciais com maior densidade de dados e mais bem distribuídos ao longo do tempo.

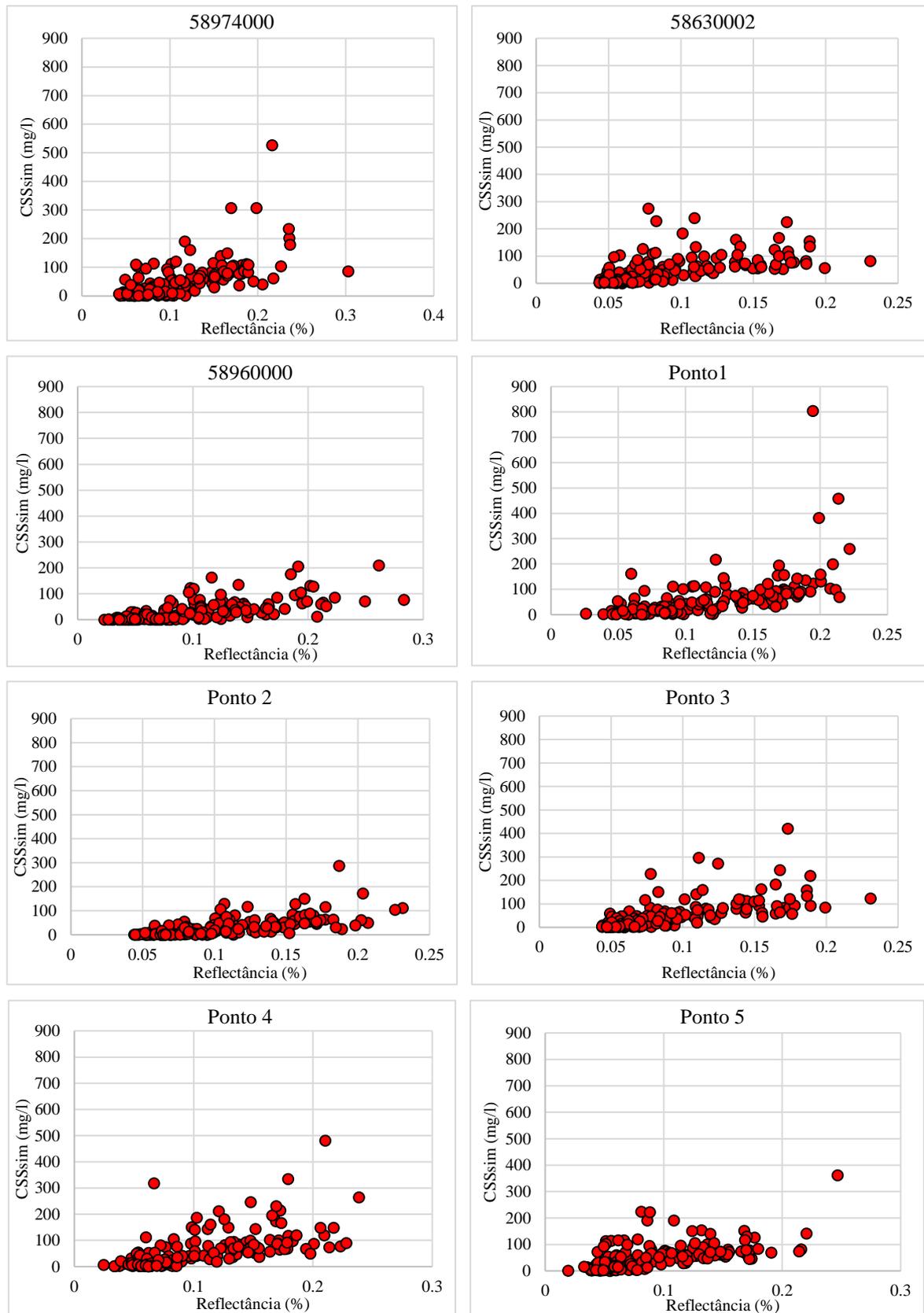


Figura 88 - Gráficos da correlação entre a CSS simulada e a refletância da banda do vermelho para todos os pontos de extração de dados no período de validação do modelo de sedimentos MGB-SED.

### 5.2.4 Calibração X Validação do Modelo de Sedimentos

A Tabela 19 a seguir apresenta um comparativo entre as diferenças absolutas dos períodos de calibração e validação do modelo de sedimentos MGB-SED para a bacia do rio Paraíba do sul. Em azul salienta-se as melhoras nas simulações do período de validação frente ao período de calibração do modelo e em vermelho são indicadas pioras nas métricas de desempenho analisadas pelo modelo.

*Tabela 19 – Comparação entre as métricas de desempenho para os períodos de calibração e validação do modelo de sedimentos MGB-SED.*

		Qss								
CÓDIGO	RIO	NASH			ΔV			r		
		Cal	Val	Δ	Cal	Val	Δ	Cal	Val	Δ
58480500	RIO PARAÍBUNA	0,34	0,26	<b>-0,08</b>	-49,46	-46,34	<b>3,11</b>	0,66	0,27	<b>-0,39</b>
58770000	RIO POMBA	0,55	0,34	<b>-0,21</b>	-45,13	94,61	<b>-49,48</b>	0,92	0,92	<b>0,00</b>
58960000	RIO MURIAÉ	0,18	-2,83	<b>-3,01</b>	-79,05	38,06	<b>40,99</b>	0,93	0,23	<b>-0,70</b>
58974000	RIO PARAÍBA DO SUL	-0,22	-1,93	<b>-1,71</b>	-52,18	45,29	<b>6,89</b>	0,14	0,72	<b>0,58</b>
		CSS								
CÓDIGO	RIO	NASH			ΔV			r		
		Cal	Val	Δ	Cal	Val	Δ	Cal	Val	Δ
58480500	RIO PARAÍBUNA	-0,35	0,27	<b>0,62</b>	-78,08	-65,41	<b>12,67</b>	0,07	0,09	<b>0,03</b>
58770000	RIO POMBA	0,27	-0,10	<b>-0,37</b>	-43,11	-9,93	<b>33,18</b>	0,61	-0,09	<b>-0,70</b>
58960000	RIO MURIAÉ	0,04	-0,21	<b>-0,24</b>	-71,53	-39,56	<b>31,96</b>	0,62	0,03	<b>-0,59</b>
58974000	RIO PARAÍBA DO SUL	-0,23	-1,62	<b>-1,38</b>	126,09	-12,39	<b>113,70</b>	0,02	0,26	<b>0,25</b>

Analisando os dados é possível perceber que as variações nas métricas de desempenho analisadas para o modelo de sedimento apresentaram variações muito maiores do que as métricas para o modelo hidrológico. Isto ocorre devido à grande indisponibilidade de dados, o que dificulta, em muito, a calibração e validação da modelagem de sedimentos. Os índices de NASH em geral apresentaram pioras do período de calibração para o período de validação, porém os erros de volume apresentaram melhora nos resultados da calibração. Essas variações podem estar associadas às diferenças nos dados observados de sedimentos para os diferentes períodos simulados.

A Figura 89 apresenta um gráfico de colunas, respectivo às comparações da correlação de Pearson entre os dados simulados pelo modelo e a reflectância espectral da banda do vermelho, para o período de calibração e validação do modelo. Em média, os resultados

apresentaram piora na correlação do período de calibração para o período de simulação do modelo.

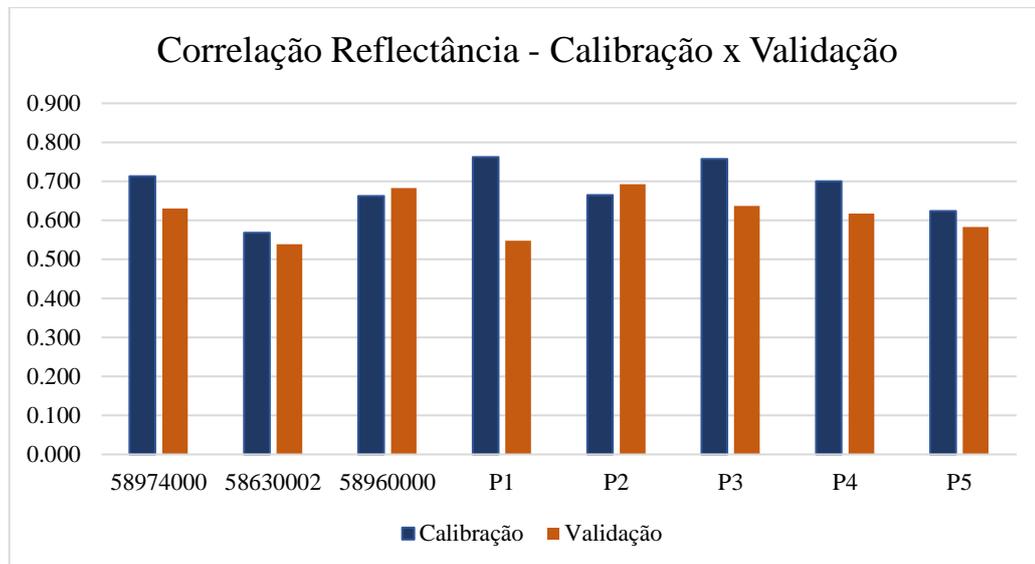


Figura 89 – Comparativo entre as correlações de Person obtidas entre os dados simulados e os dados extraídos de imagens de satélite para os períodos de calibração e validação do modelo de sedimentos MGB-SED.

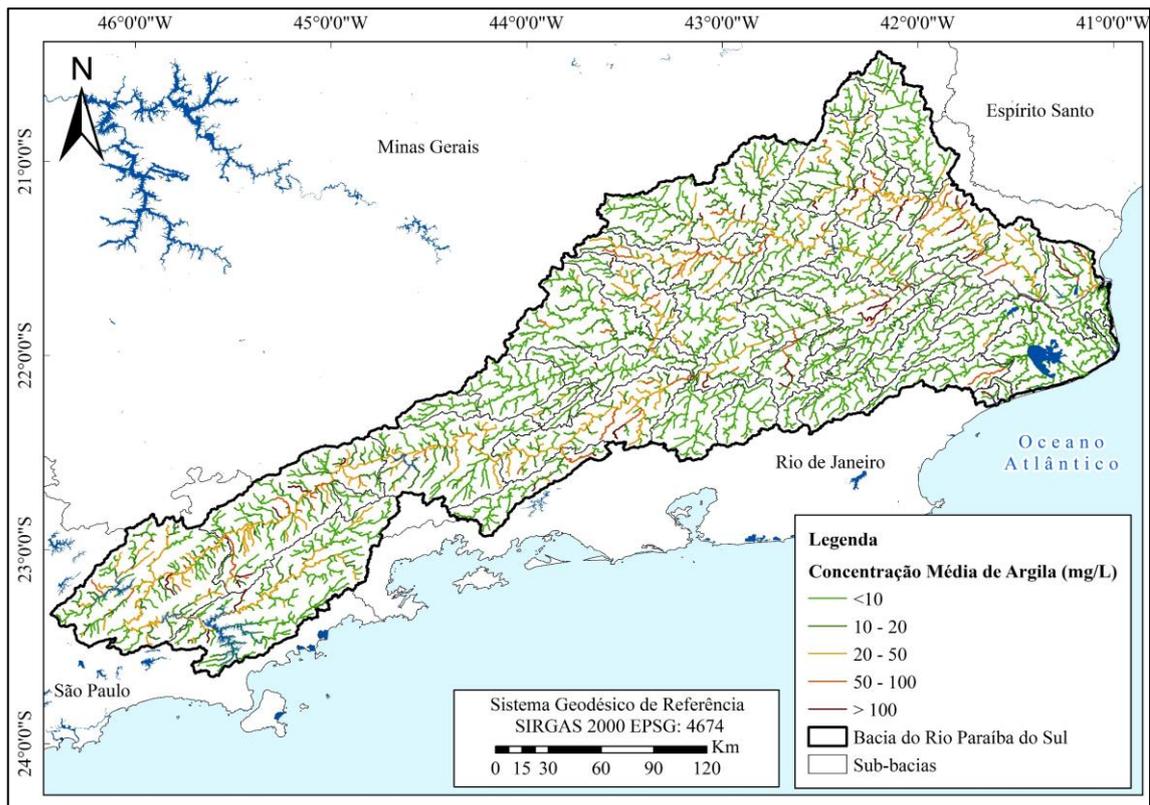
### 5.3 Análise Hidrossedimentológica da Bacia do Rio Paraíba do Sul

A partir dos dados obtidos através do modelo de sedimentos MGB-SED foi possível fazer uma análise integrada da hidrossedimentologia da bacia a partir dos resultados simulados considerando todo o período de simulado (01/01/1979 – 31/12/2010). Os resultados obtidos se expressam através das concentrações média de sedimentos em suspensão totais por trecho de rio, concentrações média de silte e argila por trecho de rio, produção média diária de sedimentos finos (t/dia) por trecho de rio, produção média anual de sedimentos finos ( $10^3$ t/ano) e a produção de sedimentos totais (silte, argila e areia), de sedimentos finos, de silte e argila, por mini-bacia de simulação, de acordo com os itens que seguem.

#### 5.3.1 Estimativa da concentração média de sedimentos por trechos de rio

A Figura 90 e Figura 91 apresentam as concentrações média de argila e silte por trecho de rio considerando todo o período de simulação. A Figura 92 apresenta a concentração média de sólidos em suspensão (argila e silte) por trecho de rio, ambas as figuras se encontram

discriminadas em faixas de concentração variando de valores menores do que 10 até maiores do que 100 mg/L. considerando a bacia com um todo, a concentração média de argila e silte giram em torno de 29 e 11 mg/L, respectivamente, totalizando cerca de 40 mg/L a partir da simulação de todo o período de análise. Grande parte do rio Paraíba do Sul apresenta concentrações média de sedimentos em suspensão superiores a 50 mg/L e seus tributários, rio Muriaé, Pomba e Preto apresentam concentração média de sedimentos em suspensão na faixa de 20 a 50 mg/L.



*Figura 90 - Estimativa da concentração média de argila por trecho de rio da bacia do rio Paraíba do Sul.*

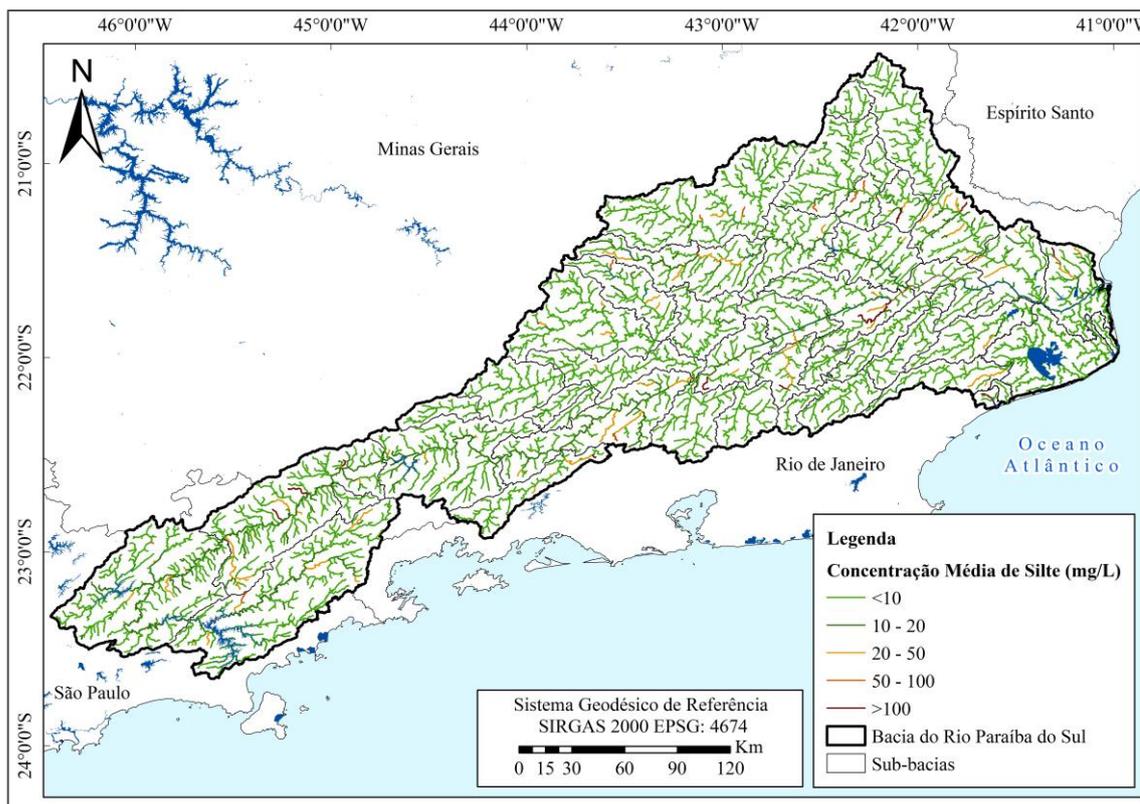


Figura 91 - Estimativa da concentração média de silte por trecho de rio da bacia do rio Paraíba do Sul.

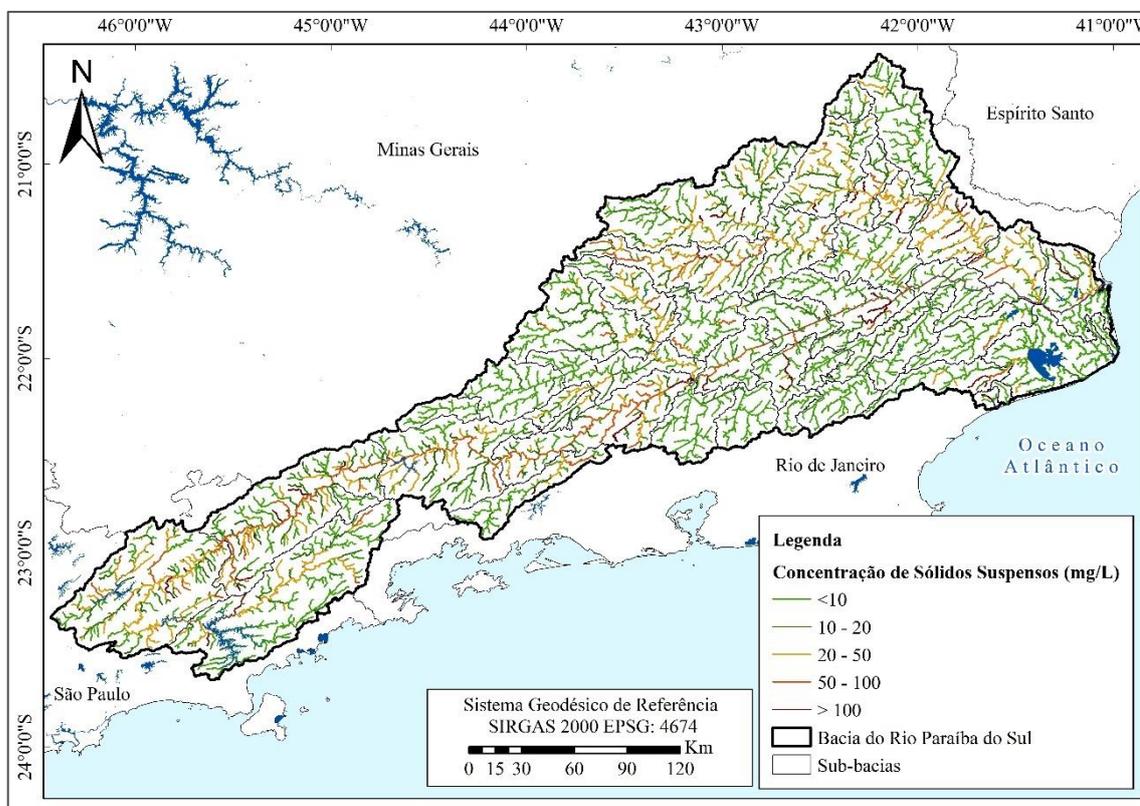


Figura 92 - Estimativa da concentração média de sedimentos em suspensão por trecho de rio da bacia do rio Paraíba do Sul.

### 5.3.2 Estimativa da descarga sólida média de longo período por trecho de rio

A Figura 93 e a Figura 94 apresentam a descarga sólida média em suspensão (Qss) diária e anual de sedimentos finos por trecho de rio da bacia do rio Paraíba do Sul, respectivamente. As figuras indicam que a Qss aumenta de montante para jusante na bacia, tanto no rio Paraíba do Sul como em seus principais afluentes devido ao fato estar associado com os incrementos de vazões na bacia. Os rios Muriaé, Pomba e Preto apresentam altos valores de descarga anual entre faixas de 100 a 500 10<sup>3</sup>t/ano, resultando em valores médios no rio Paraíba do Sul superiores a 500 10<sup>3</sup>t/ano.

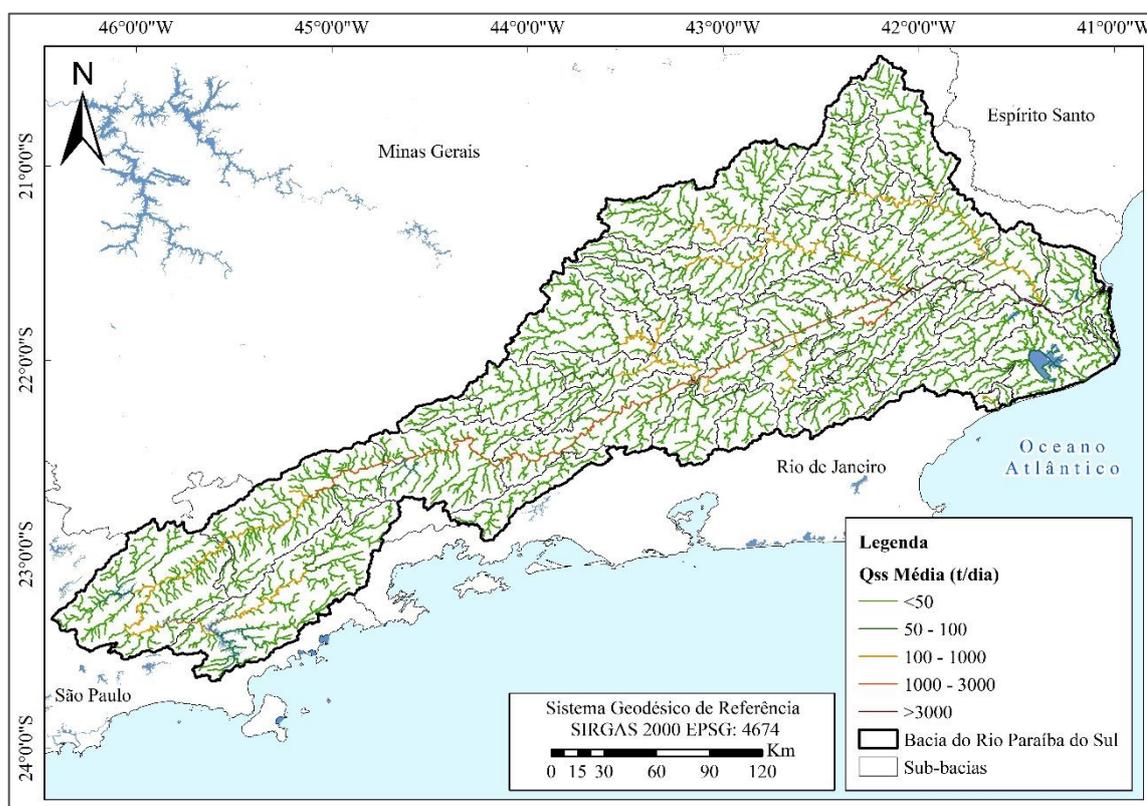


Figura 93 - Estimativa da descarga sólida média diária de sedimentos em suspensão por trecho de rio da bacia do rio Paraíba do Sul.

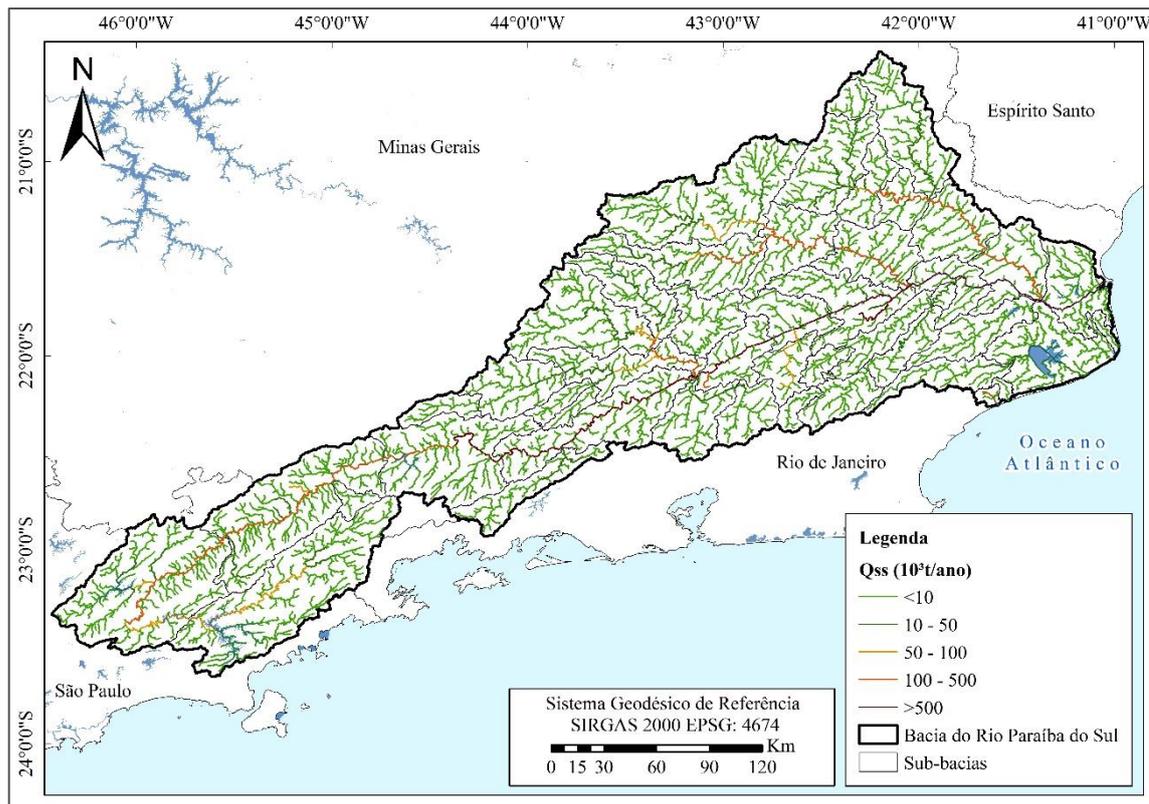


Figura 94 - Estimativa da descarga sólida média anual de sedimentos em suspensão por trecho de rio da bacia do rio Paraíba do Sul.

A Tabela 20 apresenta uma comparação entre a Qss simulada (t/ano) e seus respectivos valores descritos na análise hidrossedimentológica do plano de bacia do Rio Paraíba do sul (AGEVAP, 2014b) para os respectivos postos de simulação. A análise dos dados indica coerência entre as simulações e os valores contidos no plano. Porém houveram grandes diferenças nos valores de Qss anual nos postos do rio Paraíba do sul. Os dados do plano foram obtidos através de simples equações que calculam a Qss através da vazão observada e os dados de CSS medidos disponíveis.

Tabela 20 – Comparativo entre a descarga sólida simulada e apresentada em AGEVAP, 2014.

CÓDIGO	RIO	Qss Simulada (t/ano)	Qss AGEVAP (2014) (t/ano)	Δ (t/ano)
58480500	RIO PARAÍBUNA	35.903	46.587	10.684
58630002	RIO PARAÍBA DO SUL	943.29	1.846.086	<b>1.751.757</b>
58790002*	RIO POMBA	285.914	152.750	270.639
58770000	RIO POMBA	244.497	239.137	5.360
58960000	RIO MURIAÉ	228.485	212.081	16.404
58974000	RIO PARAÍBA DO SUL	2.351.660	3.018.846	<b>667.186</b>

\*Comparado com o posto 58790000 localizado próximo ao posto 58790002.

### 5.3.3 Estimativa da produção de sedimentos anual na bacia

A Figura 95 apresenta um mapa da estimativa da produção média anual de sedimentos finos (argila e silte) na bacia do rio Paraíba do Sul por mini-bacia, considerando todo o período de simulação. A Figura 96 e a Figura 97 apresentam estimativas individuais da produção de argila e silte na bacia, respectivamente.

A Figura 98 apresenta um mapa da estimativa da produção total anual de sedimentos (argila, silte e areia) na bacia do rio Paraíba do Sul por mini-bacia, considerando todo o período de simulação. Analisando as figuras percebe-se que elas entram em concordância com as estimativas da descarga sólida de sedimentos finos simulada, sendo as regiões próximas aos rios Muriaé, Pomba e Preto são as regiões que apresentam maior produção de sedimentos, contribuindo com maior carga de sedimentos aportados ao rio Paraíba do Sul.

A simulação de sedimentos grossos, como a areia, não entrou no escopo deste trabalho, as simulações foram calibradas e validadas somente para os sedimentos em suspensão (argila e silte). No mapa se encontram somados as produções de sedimento de silte, argila e também areia, mesmo que a calibração do modelo somente tenha envolvido sedimentos em suspensão.

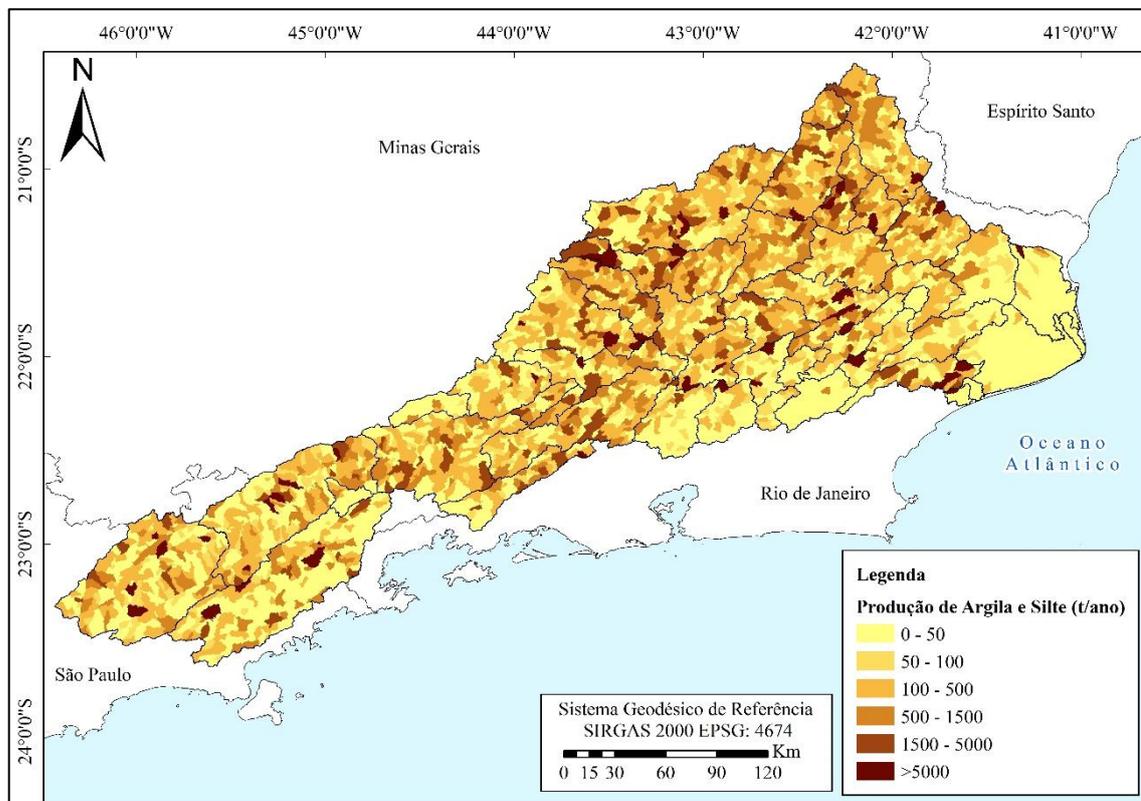


Figura 95 - Mapa da estimativa da produção de sedimentos finos (argila e silte) em toneladas por ano para a bacia do rio Paraíba do sul.

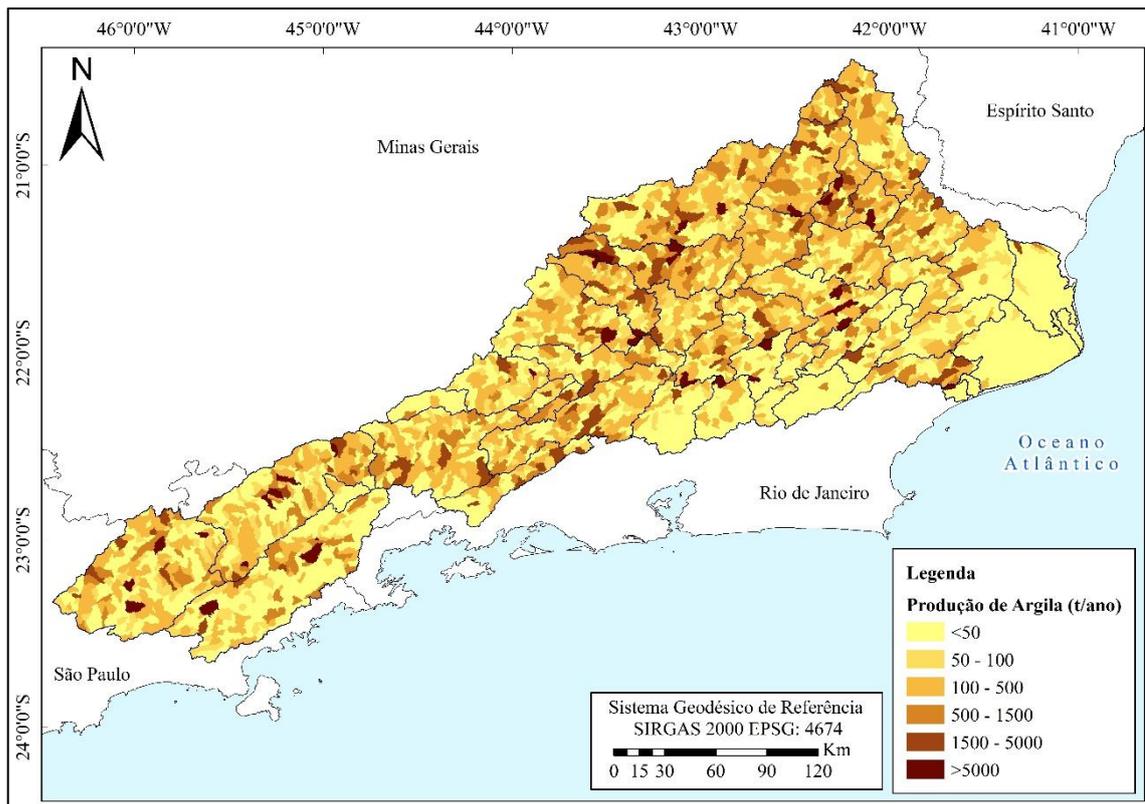


Figura 96 - Mapa da estimativa da produção de argila em toneladas por ano para a bacia do rio Paraíba do sul.

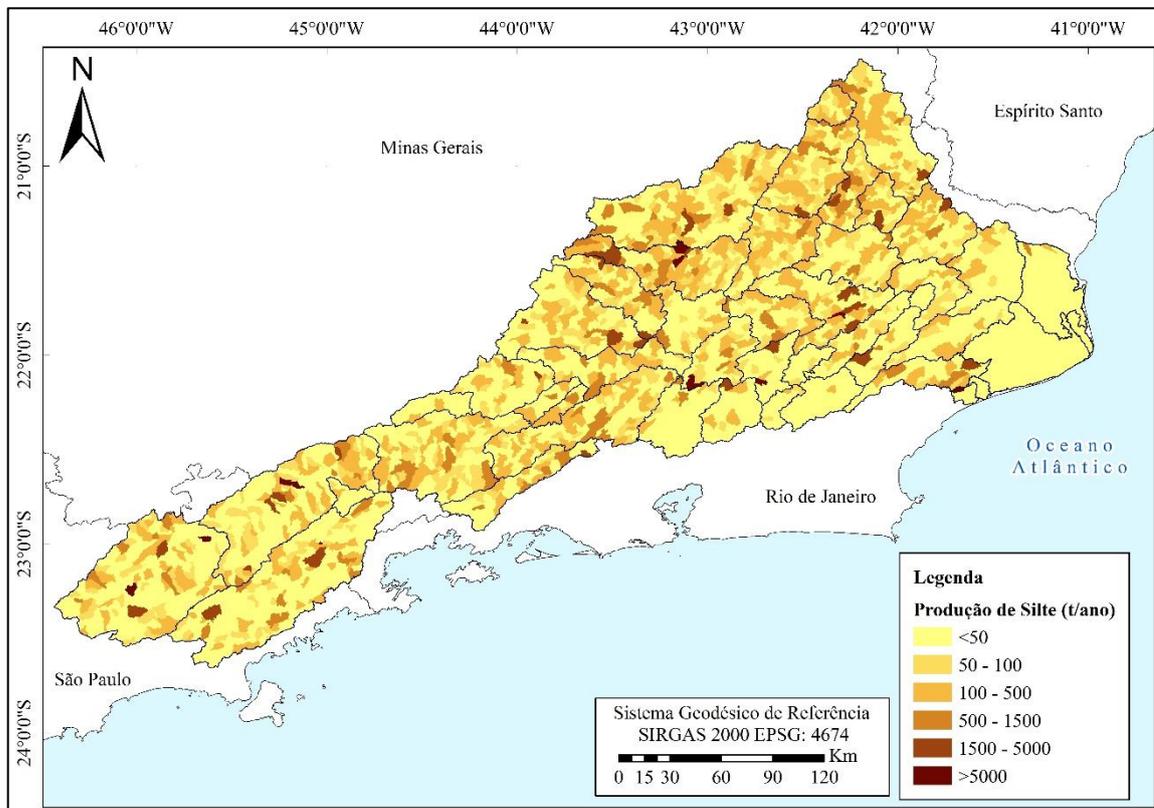
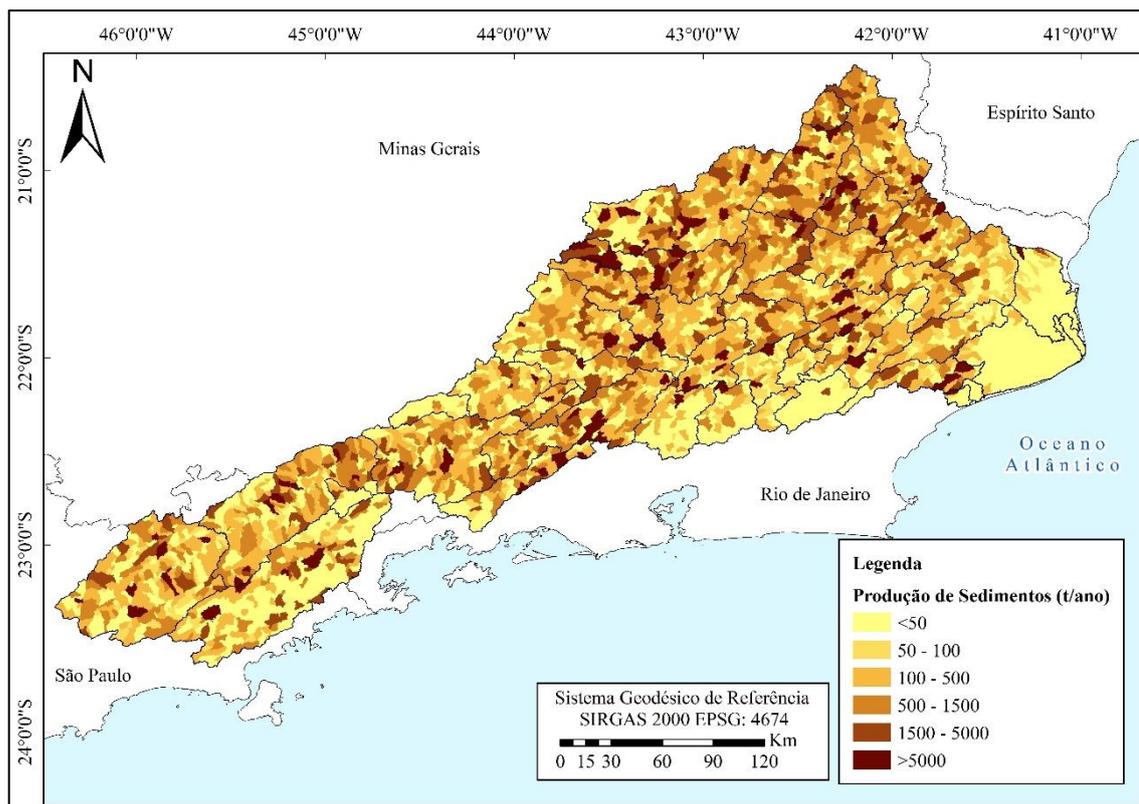


Figura 97 - Mapa da estimativa da produção de silte em toneladas por ano para a bacia do rio Paraíba do sul.



*Figura 98 – Mapa da estimativa da produção de sedimentos totais (argila, silte e areia) em toneladas por ano para a bacia do rio Paraíba do sul.*

## 6. CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a aplicação de um modelo de simulação hidrossedimentológica em uma grande região hidrográfica do Brasil, a bacia do rio Paraíba do Sul, com o apoio de dados medidos *in situ* e produtos de sensoriamento remoto. O estudo se mostrou promissor e capaz de promover a análise hidrossedimentológica da bacia de forma satisfatória, atendendo o seu objetivo principal. Assim, são respondidos os objetivos específicos do presente estudo:

- *Avaliar, para a bacia de estudo, se os resultados obtidos de vazões simuladas a partir do modelo hidrológico (MGB-IPH) apresentam boa correlação com dados medidos de vazão de postos fluviométricos.*

A simulação hidrológica da bacia do rio Paraíba do Sul se mostrou muito satisfatória e promissora. Há na bacia uma grande disponibilidade de postos pluviométricos e fluviométricos com grande disponibilidade de dados contínuos e bem distribuídos na bacia. Ao todo foram utilizados mais de 400 postos de medição de chuva como entrada no modelo e 31 postos com medições de vazão para calibração do modelo.

O modelo foi calibrado de forma eficiente e apresentou resultados satisfatórios, avaliados através das métricas de desempenho de Nash-Sutcliffe, logaritmo de Nash-Sutcliffe e erro de volume, para os quais apresentaram resultados considerados muito bons em mais de 60% dos postos analisados e em menos de 10% considerados insatisfatórios, tanto para o período de calibração, quanto para o período de validação das simulações de vazão.

A bacia do rio Paraíba do Sul em suas áreas de cabeceira próximas às serras da Mantiqueira e do Mar apresenta grande influência de reservatórios e transposições na dinâmica de escoamento dos rios e devido a este fato optou-se por não considerar essa região na calibração e validação do modelo.

- *Compreender se é possível extrair uma correlação entre concentração de sólidos em suspensão (CSS) simulada pelo modelo e a reflectância espectral da faixa do vermelho de imagens de sensoriamento remoto dada a disponibilidade dos dados medidos *in situ*.*

Inicialmente, foi realizada uma aquisição de imagens de satélite a partir da maneira convencional de pedidos de dados junto às plataformas de acesso aos servidores da NASA e obtenção de dados em forma de arquivos individuais para cada imagem registrada para a região da bacia pelos sensores dos satélites *Landsat*. Após grande demanda de esforço e tempo na aquisição e manipulação dos dados não se obteve êxito algum na extração dos dados necessários para realizar as análises referentes à hidrossedimentologia da bacia. Somente após desistência da metodologia tradicional e migração para o *Google Earth Engine* (GEE) que foi possível extrair os dados nos pontos estipulados e analisa-los frente às simulações do modelo MGB-SED.

Após a escritas de rotinas de aquisição de dados no GEE foi possível analisar de forma rápida e inferir que a concentração de sedimentos em suspensão comparada às primeiras simulações do modelo MGB-SED apresentaram altos valores de correlação de Pearson, inclusive em zonas do rio com margens estreitas, não muito maiores do que a resolução espacial de 30 metros dos sensores dos satélites *Landsat*.

Em virtude dos períodos definidos para calibração (01/01/1979 – 01/01/2000) e validação (02/01/2000 – 31/12/2010) dos modelos hidrológico e de sedimentos, não foi possível analisar os dados obtidos através do satélite *Landsat* 8, disponíveis apenas a partir de 2013.

- *Avaliar se é possível realizar a calibração e validação do modelo hidrossedimentológico a partir dos dados medidos contando com a verificação do modelo a partir dos dados obtidos de produtos de sensoriamento remoto.*

Ao se analisar os dados de sedimentos disponíveis na bacia do rio Paraíba do Sul foi possível perceber a grande carência de medições da concentração de sedimentos em suspensão na região da bacia disponíveis junto à plataforma de aquisição de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), *hidroweb*. Grande quantidade dos postos sedimentométricos existentes na bacia apresentavam menos de 10 observações durante todo o período de disponibilidade de dados.

Por fim foram selecionados apenas seis postos com maior quantidade de dados medidos de sedimentos a fim de comparação dos dados simulados pelo modelo e auxiliar na calibração e validação do modelo. Esses seis postos se apresentavam de forma bem homogênea na bacia e foram capazes de auxiliar na calibração e validação dos dados simulados no rio Paraíba do Sul, no rio Muriaé, no rio Pomba e no rio de cabeceira, Paraíbuna. Devido à falta de dados outros grandes rios não foram possíveis de serem representados.

Os dados medidos de sedimentos disponíveis nos postos selecionados não eram suficientes em quantidade para representar a dinâmica das variações na concentração de sólidos em suspensão nos rios e apresentavam um característico aumento nos dados da concentração no período de calibração do modelo, o que dificultou a calibração e validação dos dados simulados. Em geral as métricas de desempenho analisadas, para os postos selecionados, se mostraram satisfatórias não apresentando grande quantidade de valores insatisfatórios para o período de calibração do modelo. Salienta-se que a inserção dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  da MUSLE auxiliaram a representar melhor os dados observados atribuindo-se maior peso na produção de sedimentos às vazões mais altas simuladas pelo modelo MGB-IPH.

As altas correlações encontradas entre os dados simulados pelo modelo de sedimentos e a reflectância espectral da superfície da água na banda do vermelho foram de grande valia no auxílio à calibração do modelo agregando uma maior, e melhor distribuída ao longo do tempo, disponibilidade de dados que contribui de forma satisfatória à conferir confianças nas simulações realizadas pelo modelo.

A região da bacia não representada para o modelo hidrológico também não foi representada pelo modelo de sedimentos salientando-se a dúvida sobre a influência que os reservatórios e as transposições da bacia podem acarretar na dinâmica dos sedimentos da bacia.

A partir dos parâmetros da equação de MUSLE calibrados para a bacia foi possível simular um período de verificação dos dados e os resultados se apresentaram também de formar satisfatória em linhas gerais. Comparados com os dados obtidos no período de calibração do modelo houve significativa piora nos índices de eficiência de Nash-Sutcliffe. Porém os erros de volume da concentração de sólidos em suspensão obtiveram melhoras para todos os postos indicando que a diferença percebida nos valores de concentrações dos dois períodos gerou significativas mudanças nas métricas de desempenho do modelo.

O período de calibração do modelo MGB-SED correspondeu a um período de décadas antigas, nas quais práticas conservacionistas do solo usualmente não eram estimuladas e concretizadas. Esse fato pode explicar a diferença dos dados observados e também pode-se citar que a constatação de eventos pontuais e isolados, como escorregamentos de massa, podem afetar diretamente medições de sedimento.

A análise da correlação entre os dados observados e os dados obtidos dos produtos de sensoriamento remoto também foi de grande auxílio na análise dos dados obtidos para a

validação do modelo à medida que picos de concentração nas simulações foram observados pelo satélite em dias de baixa reflectância salientando uma possível superestimativa do modelo nos picos de concentração de sedimentos.

- *Realizar uma análise hidrossedimentológica da bacia de estudo a partir dos resultados obtidos do modelo de sedimentos, considerando concentrações médias de sedimentos em suspensão, descarga sólida anual e a produção de sedimentos da bacia.*

A partir dos resultados obtidos através do modelo MGB-SED foi possível realizar uma análise hidrossedimentológica da bacia do rio Paraíba do Sul através da composição de mapas de concentrações médias de sedimentos em suspensão por trecho de rio, descarga sólida média anual da bacia e produção de sedimentos média de longo período. Os dados de Qss foram comparados com cálculos gerados pelo plano de bacia do rio Paraíba do Sul (AGEVAP, 2014b) e apresentaram resultados semelhantes com exceção dos postos de sedimentos do rio Paraíba do Sul, onde houve subestimação da descarga sólida simulada comparada aos cálculos do plano.

Por fim, uma última consideração se faz necessária. Toda e qualquer métrica alternativa de obtenção de dados é válida e presta grande auxílio à calibração e validação de modelos que simulam o comportamento hidrossedimentológico de corpos d'água. Porém nada substitui a necessidade e a importância do dado medido.

## 7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os tópicos a seguir destinam-se a instigar possíveis ideias e indicações de trabalhos futuros a partir dos resultados obtidos neste estudo:

- Analisar a influência dos reservatórios e transposições presentes na bacia do rio Paraíba do Sul na hidrossedimentologia da bacia a partir da inserção do módulo de reservatórios do modelo MGB-IPH com a possibilidade de desenvolvimento de um módulo de deposição de sedimentos em grandes reservatórios no modelo MGB-SED.
- Definir uma metodologia que se destine a extrair uma equação que descreva a concentração de sólidos em suspensão no rio a partir dos dados da banda do vermelho e analisar a substituição dos dados medidos pelos dados obtidos para calibrar e validar o modelo.
- Realizar análise das correlações entre os dados da banda do vermelho para as frações de silte e argila em separados e verificar se há melhora na comparação dos dados. Bem como é interessante analisar a correlação dos dados perante outras bandas dos satélites como a banda do verde ou infravermelho.
- Simular o modelo para um período de tempo mais recente e analisar a CSS simulada a partir do sensor *Landsat 8* e comparar os dados obtidos aos dados dos demais satélites.
- Avaliar de forma mais aprofundada a influência dos *pixels* de margem dos rios nos dados de reflectância da água e determinar até que largura dos rios da bacia os dados obtidos se correlacionam com os dados simulados pelo modelo.
- Alterar as configurações do modelo para discretizar e possibilitar alterações nos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  da MUSLE por sub-bacia de calibração e comparar com os resultados obtidos neste estudo.
- Avaliar a existência de práticas conservacionistas na bacia e realizar possíveis modificações no fator P da MUSLE e analisar os resultados apresentam melhora nas simulações e até mesmo fornecem diretrizes para calibrações mais precisas dos outros parâmetros do modelo.

- Mapear através de pesquisas e imagens de satélites possíveis eventos de escorregamentos de massa, suas frequências, magnitudes, seu impacto nas concentrações de sedimentos finos em suspensão nos rios e promover melhorias na simulação a partir dos resultados.
- Desenvolver um módulo acoplado ao modelo MGB-SED que agregue a possibilidade de inserção de altas concentrações pontuais que se disponha a simular melhor a hidrossedimentologia dos rios agregando o efeito de eventos isolados.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLA, F, A; LETTENMAIER, D, P; LIAN, X. Estimation of the ARNO model baseflow parameters using daily streamflow data. **Journal of Hydrology**, v. 222, p. 37-54, 1999.

ALAMY, E, F; HARRY, J; HARRY, S. **Modelação do Transporte de Sedimentos Sobre Leitos Deformáveis com Uso da Equação de Advecção-Difusão e do Método de Fronteira Imersa**. 2006.

ARNOLD, J, G; SRINIVASAN, R; MUTTIAH, R, S; WILLIAMS, J, R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. **Journal American Water Works Association**, v. 34, p. 73-89, 1998.

Aroma R, J; KUMUDHA, R. **A review on availability of remote sensing data**. Technological Innovation in ICT for Agriculture and Rural Development. Índia, 2015

ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL – AGEVAP. **Plano de Recursos Hídricos da bacia do rio Paraíba do Sul – Resumo – Plano de Recursos Hídricos Consolidado**, 2007.

ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL – AGEVAP. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e Planos de Ação de Recursos Hídricos das Bacias Afluentes – Relatório Diagnóstico (RP-06) TOMO I**. 2014.

ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL – AGEVAP. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e Planos de Ação de Recursos Hídricos das Bacias Afluentes – Relatório Diagnóstico (RP-06) TOMO III**. 2014.

BANNISTER, T, T. Estimation of absorption coefficients of scattering suspensions using opal glass. **Limnology and Oceanography**, v. 33, p. 607-615. 1988.

- BEASLEY, D, B; HUGGINS, L, F; MONKE, E, J. Answers - a model for watershed planning. p. 938–944, 1980. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 23 p. 938–944, 1980.
- BESKOW, S; MELLO, C, R; NORTON, L, D; CURI, N; VIOLA, M, R; AVANZI, J, C. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. **Catena**, v. 79, p. 49–59. 2009.
- BRANCO, N. **Avaliação da Produção de Sedimentos de Eventos Chuvosos em uma Pequena Bacia Hidrográfica Rural de Encosta**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 1998.
- BREMICKER, M. **Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells für das Weser und das Ostsee Einzugsgebiet als Baustein eines Atmosphären-Hydrologie-Modells**. Thesis Doctorate - Geosciences Faculty of the Albert-Ludwigs, University. Freiburg, 1998.
- BRUNK, S. **Methods of computing sedimentation in lakes and reservoirs**. Paris: Unesco, 1985.
- BUARQUE, D, C. **Simulação da geração e do transporte de sedimentos em grandes bacias: Estudo de caso do Rio Madeira**. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2015, 224p.
- CAMPOS, J, D. **Cobrança pelo uso da água nas transposições da bacia do rio Paraíba do Sul envolvendo o Setor Elétrico**. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.2001
- CARVALHO, N, O.; FILIZOLA JÚNIOR, N, P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA J, E, F, W. **Guia de Práticas Sedimentométricas**. Brasília: ANEEL, 2000. 154p.
- CARVALHO, N, O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2ª edição, Rio de Janeiro: Interciência, 2008.
- CHANG, H, H. Modeling of river channel changes. **Journal of Hydraulic Engineering**, p. 157-172, 1988.
- CHOW, V, T. **Handbook of applied hydrology**. New York: McGraw-Hill Book Co. 1964.

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.

CURRAN, P. **Principles of Remote Sensing**. Longman Scientific and Technical, UK, 1985, 282p.

COLLISCHONN, W; ALLASIA, D; SILVA, B, C; TUCCI, C, E, M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, p. 878-895, 2007.

COLLISCHONN, W; ALLASIA, D; SILVA, B. C; TUCCI, C. E. M. **The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling**.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. Tese de Doutorado - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

COLLISCHONN, W; TUCCI, C, E, M. Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, p. 95-118, 2001.

DAVID, W. P. **Soil and Water Conservation Planning: Policy Issues and Recommendations**, *J. Philipp. Dev.* p. 47–84, 1988.

DE ROO, A, P, J; OFFERMANS, R, J, E; CREMERSM, N, H, D, T. A Single-Event, Physically Based Hydrological and Soil Erosion Model for Drainage Basins 11: Sensitivity Analysis, Validation and Application. **Hydrological Processes**, Vol. 10, p. 1119-1126. 1996.

DE VENTE, J; POESEN, J; VERSTRAETEN, G; GOVERS, G; VANMAERCKE, M; VANROMPAEY, A; BOIX-FAYOS, C. Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: where do we stand? **Earth Sci. Rev.**, p. 16-29, 2013.

DEKKER, R. Application of maintenance optimization: a review and analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, v.51, p. 229-240, 1996.

Department of Land and Water Conservation. **IQQM-integrated water quality and quantity model, Catchment Processes and Modelling Branch**. 1995.

DERPSCH, R.; ROTH, C.H.; SIDIRAS, N. & KOPKE, U. **Controle da erosão no Paraná**, Brasil: Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. 1991. 272p.

DUMAS, P; FOSSEY, M. Mapping potential soil erosion in the Pacific Islands: A case study of Efate Island (Vanuatu), **11th Pacific Science Inter-Congress: Pacific Countries and Their Ocean, Facing Local and Global Changes**, 2009.

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.

FAGUNDES, H. O; FAN, F. M; PAIVA, R. C. D; BUARQUE, D. C. Congresso Internacional de Hidrossedimentologia. Simulação hidrossedimentológica preliminar na bacia do Rio Doce com modelo MGB-SED. **Anais...** 2017.

FAGUNDES, H, O. **Modelagem Hidrossedimentológica de Grandes Bacias com Apoio de Dados In Situ e Sensoriamento Remoto**. Dissertação de Mestrado – Instituto de Pesquisas hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. 201p.

FAGUNDES, H, O; PAIVA R. C. D; FAN, F. M; XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Sedimentos em suspensão observados com imagens *Landsat* para modelagem de grandes bacias. **Anais...** Florianópolis: 2017.

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.

FAN, F, M; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, p. 243-254, 2014.

FAN, F. M; COLLISCHONN, W. Sobre o Início da Rede de Drenagem Definida a Partir dos Modelos Digitais de Elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V. 18, p. 241-257, 2013.

FAN, F. M. **Previsão por conjunto de vazões afluentes a reservatórios em grandes bacias hidrográficas brasileiras**. 2015. 384 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015, 384 p.

FARR, T. G; ROSEN, P. A; CARO, E; CRIPPEN, R; DUREN, R; HENSLEY, S; KOBRICK, M; PALLER, M; RODRIGUEZ, E; ROTH, L; SEAL, D; SHAFFER, S; SHIMADA, J; UMLAND, J; WERNER, M; OSKIN, M; BURBANK, D; ALSDORF, D. **The Shuttle Radar Topography Mission. Reviews of Geophysics**, v. 45, 2007.

FAO. **Digital Soil Map of the World 3.6**. FAO Geonetwork. Disponível em: < <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116>>. Último acesso: 15 de junho de 2019. 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.

FERNANDEZ, C. W. J; McCOOL, D; STOECKLE, C. Estimating water erosion and sediment yield with GIS, RUSLE, and SEDD, J. *Soil Water Conserv.* p. 128–136, 2003.

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.

FLEISCHMANN, A; SIQUEIRA, V. A; COLLISCHONN, W; FAN, F. M. Desenvolvimento do Módulo de Reservatórios do Modelo Hidrológico MGB-IPH. **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Brasília, Distrito Federal, novembro de 2015

GORELICK, N. *et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**. v. 202, p. 18–27, 2017.

HAYAKAWA, E, D. **Análise da variabilidade espacial e temporal dos sedimentos suspensos do alto Rio Paraná via imagens orbitais:** Região de Porto São José – Pr, Maringá: Universidade Estadual de Maringa, 2007.

INEA. **Avaliação Ambiental do Rio Paraíba Do Sul - Trecho Funil - Santa Cecília - Relatório Técnico.** 2010.

JARDIM, P; SIQUEIRA, V; FLEISCHMANN, A; FAN, F; COLLISCHONN, W. **IPH-Hydro Tools: Pacote de Ferramentas Open Source de Geoprocessamento Aplicado a Recursos Hídricos.** 2015

JENSEN, J, R. **Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective,** New Delhi: Pearson Education India, 2009. 613 p.

JENSEN, J, R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.** São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p.

JORDÃO, M. D. L; SOUZA, R. C. C; VINZON, S. B; GALLO, M. N. Volume Anual de Sedimentos em suspensão Desviado do Rio Paraíba do Sul para o Rio Gandu Durante a Crise Hídrica. **III Simpósio de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul.** São Pedro, Minas Gerais.

KAYSER, R; RUHOFF, A. Mapeamento da Evolução Espacial e Temporal de Áreas Agrícolas no Bioma Pampa Utilizando Fenologia da Vegetação e Google Earth Engine. **Anais...** Santos, São Paulo, Abril 2019

KNISEL, W, G; **Creams:** A Field Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems. 1980.

KRYSANOVA, V; MÜLLER-WOHLFEIL, D; BECKER, A. Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. **Ecological Modelling**, v.106 p.261-289, 1998.

KRYSANOVA, V; WECHSUNG, F; ARNOLD, J; SRINIVASAN, R; WILLIAMS, J. **SWIM, User manual,** PIK-Report. Potsdam Institute for Climate Impact Research, 2000.

KUOK, K. K; MAH, D. Y. S; CHAN, C. P. Evaluation of C and P Factors in Universal Soil Loss Equation on Trapping Sediment: Case Study of Santubong River. **Journal of Water Resource and Protection**, p. 1149-1154, 2013.

LAFLEN, J, M; LANE, L, J; FOSTER, G, R. WEPP: A new generation of erosion prediction technology. **Journal of Soil and Water Conservation**, p. 34–38, 1991.

Land Development Department: Assessment of Soil Loss using the Equation of Soil Loss, Bangkok, Thailand, 2002.

LELIS, T, A; CALIJURI, M, L. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT. **Ambiente e Água – Na Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 5, n. 2, p. 158–174, 2010.

LIANG, X; P, LETTENMAIER, D; WOOD, E; BURGESS, S; **A Simple hydrologically Based Model of Land Surface Water and Energy Fluxes for GSMs**. J. Geophys. 1994.

LILLESAND, T; KIEFER, R, W; CHIPMAN, J. **Remote Sensing and Image Interpretation**. New York: Wiley, 2007. 756 p.

LOHMANN, D; RASCHKE, E; NIJSSEN, B; LETTENMAIER, D, P. Regional scale hydrology: I. Formulation of the VIC-2L model coupled to a routing model. **Hydrological Sciences Journal**. v. 43, n. 1; p. 131-141, 1998.

LUNA, S, V, de. **Planejamento de pesquisa: uma introdução**. São Paulo: EDUC, 1997.

MACHADO, R, E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002, 166f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

MARENGO, J, A; ALVES, L, M. Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba Do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.2, p. 215-226, 2005.

MENDES, C, A, B. **Planejamento Nacional de Recursos Hídricos Baseado no Uso de Técnicas de Geoprocessamento**. 1998. 9 p.

- MERTES, L, A, K; SMITH, M, O; ADAMS, J, B. Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon River wetlands from *Landsat* images. **Remote Sensing of Environment** v. 43 p. 281-301.1993.
- 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.
- MINELLA, J, P, G; MERTEN, G, H; RUHOFF, A, L. Utilização de métodos de representação especial para cálculo do fator topográfico na Equação Universal de Perda de Solo revisada em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1455-1462, 2010.
- MOLNÁR, D, K; JULIEN, P, Y. Estimation of Upland Erosion Using GIS. **Computers & Geosciences**, v. 24, n. 2, p. 183-192. 1998.
- MORGAN, R, P, C. **Soil erosion and conservation**. 3 ed. Inglaterra: Blackwell Publishing, 2005. 304p.
- 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.
- MORRIS, G, L; Fan, J. **Reservoir Sedimentation Handbook**, New York: McGraw-Hill Book Co, 1998.
- PANDEY, A; CHOWDARY, V, M; MAL, B, C. Identification of critical erosion prone areas in the small agricultural watershed using USLE, GIS and remote sensing. **Water Resources Management**, v.21, p. 729–746. 2007.
- PONTES, P, R; COLLISCHONN, W; FAN, F, M; PAIVA, R, C; BUARQUE, D, C. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 888-904, 2015.
- PONZONI, F. J; SHIMABUKURO, E. Y. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos, São Paulo: Arêntese Editora, 2009.

PROSSER, I, P; YOUNG, B; RUSTOMJI, P; HUGHES, A; MORAN, C. A model of river sediment budgets as an element of river health assessment. **Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation**, p. 861-866, 2001.

RAFAELI NETO, S. L. **Um modelo conceitual de sistema de apoio à decisão espacial para gestão de desastres por inundações**. 2000, 231p, Tese de Doutorado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

RENARD, K, G; FOSTER, G, R; YODER, D, C; MCCOOL, D, K, R. Revisited: tatus, questions, answers, and the future **Journal of Soil and Water Conservation**. v. 49, n. 3, p. 213-220, 1994.

RENARD, K, G; FOSTER, G, R; WEESIES, G, A; MCCOOL, D, K; YODER, D, C; Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, **Agriculture Handbook**, n. 703, p. 404, 1997.

RENARD, K, G; FOSTER, G, R; WEESIES, G, A; PORTER, J, P, R. Revised Universal Soil Loss Equation. **Journal of Soil and Water Conservation**. v. 46, n. 1, p. 30-33, 1991.

RITCHIE, J, C; ZIMBA, P, V; EVERITT, J, H. Remote sensing techniques to assess water quality. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing** v. 69 p. 695-704 2003.

ROCHA, C, H, B. **Geprocessamento Tecnologia Tansdisciplinar**. Juiz de Fora: Ed. Do Autor. 2000.

RODRIGUES, M. Introdução ao Geoprocessamento. **Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São Paulo. p. 1-26. 1990.

ROSSONI, R; B. **Simulação Hidrossedimentológica de Grandes Bacias: O estudo de caso da bacia da Laguna dos Patos**. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto de Pesquisas Hídricas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2018. 226p.

SCHMIDT, G.L., JENKERSON, C.B., MASEK, J., VERMOTE, E., GAO, F. **Landsat ecosystem disturbance adaptive processing system (LEDAPS) algorithm description**: U.S. Geological Survey Open-File Report 2013, 17 p.

- SCOTTÁ, F, C; **A Hidrodinâmica e Sedimentologia do Rio Guaíba Analisados por Sensores Geoacústicos e Orbitais**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2018. 127p.
- SHERMAN G, E, SUTTON T, BLAZEK R, HOLL S, DASSAU O, MORELY B, MITCHELL T AND LUTHMAN L. **Quantum GIS User Guide** - Version 1.7, 2011
- SHUTTLEWORTH, W, J. Evaporation. In: MAIDMENT, D. **Handbook of hydrology**. 1993. 1424p.
- SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. edição. Florianópolis: UFSC, 2005. 138p.
- SILVA, J, X; CARVALHO, L, M, F. 4 Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento. Sistemas de Informação Geográfica: uma proposta metodológica. **Anais...** São Paulo: USP, Conferência Latino-Americana sobre Sistemas de Informação Geográfica, p.609-628. 1993.
- SILVA, L, P. **Modelagem e Geoprocessamento na identificação de áreas com risco de inundação e erosão na bacia do Rio Cuiá**, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007. 114p.
- SILVA, V, R, C; WILSON, J, G. **Hidráulica Fluvial**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. 2006, v.2, 256 p.
- SILVEIRA, C, W. **Análise de Sensibilidade de Vazões a Alterações de Precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Carinhanha**. 2015. p. 72. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental e Sanitária). Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.
- SIQUEIRA, V, A; FLEISCHMANN, A, S; JARDIM, P, F; FAN, F, M; COLLISCHONN, W. IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in open-source environment. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, p. 274-287, 2016.
- SIMONS, M; PODGER, G; COOKE, R. **IQQM—a hydrologic modelling tool for water resource and salinity management**. Environmental Software. 1996.
- SMITH, D, D. and WHILT, D, M. Evaluating soil losses from field areas. 1948. **Journal of Agricultural Engineering**, v. 29, p. 394-396. 1948.

- SOARES, P, V. **As inter-relações de elementos do meio físico natural e modificado na definição de áreas potenciais de infiltração na porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências (UNICAMP), 2005.
- SOUZA JR, D, I. A degradação da bacia do rio Paraíba do Sul. **Engevista**, v. 6, n.3, 2004.
- SUBCOMMITTEE ON SEDIMENTATION. **Determination of Fluvial Sediment Discharge**. **Inter-Agency Committee on Water Resources**. Report nº 14. Washington, 1963.
- TUCCI, C, E, M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.
- VANONI, V, A. **Sedimentation Engineering**. New York: ASCE. ISBN. 1977.
- VINEY, N, R. SIVAPALAN, M. A conceptual model of sediment transport: application to the Avon River Basin in Western Australia. **Hydrological Processes**, p. 727–743, 1999.
- WIGMOSTA, M. S; VAIL, L. W; LETTENMAIER, D. P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. **Water Resources Research**, v. 30, n. 6, p. 1665-1679, 1994.
- WILLIAMS, J, R. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. **Proceedings of the Sediment-Yield Workshop**. Oxford. 1975.
- WISCHMEIER, W, H; SMITH, D, D. **Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountain**. Washington: ARS/USDA. 1965.
- WISCHMEIER, W, H; SMITH, D, D. Predicting rainfall losses: A guide to conservation planning. In: **USDA Agricultural Handbook**. Washington: Gov.Print. Office, 1978.
- WOOD, E, F; LATTENMAIER, D, P; ZARTARIAN, V, G. A land surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models. **Journal of Geophysical Research**. v. 97, p. 2717-2728, 1992.
- YOUNG, R, A; ONSTAD, C, A; BOSCH, D, D; ANDERSON, W, P. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.44, p.4522-4561, 1989.

ZHANG, G.; LIU, B.; HAN, Y.; ZHANG, X. C. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: I. transport capacity estimation. **Soil Science of America Journal**, Madison, v.73, p.1291–1297, 2009.

ZINGG, A, W. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff. **Journal of Agricultural Engineering**, v. 21, p. 59-64. 1940.

## APÊNDICES

### Apêndice I – Rotina de Extração de dados do Google Engine

Como a plataforma do GEE é online, o código pode ser acessado e rodado por qualquer usuário cadastrado através do link:

<https://code.earthengine.google.com/26ef68a4a7304ec849064a0fb886dca0>

```
/* ROTINA DE EXTRAÇÃO DE DADOS DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO DOS SATÉLITES LANDSAT
A PARTIR DE PONTOS PRÉ
```

```
DEFINIDOS
```

```
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - EDUARDO NASCIMENTO MANARA - ENGENHARIA HÍDRICA
```

```
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS - IPH/UFRGS */
```

```
/* -----
```

```
DEFINIR PERÍODO INICIAL E FINAL */
```

```
var start_date = ee.Date.fromYMD(1986, 1, 1);
```

```
var end_date = ee.Date.fromYMD(2018, 12, 31);
```

```
/* -----
```

```
DEFINIR SHAPEFILE COM OS POSTOS DE SEDIMENTO */
```

```
var postos_sed = ee.FeatureCollection('users/eduardonmanara/Pontos_Correl_Landsat')
```

```
/* -----
```

```
DEFINIR COLEÇÕES DE IMAGENS LANDSAT */
```

```
// LANDSAT 5
```

```
var col_Landsat_5 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LT05/C01/T1_SR")
```

```
.filterDate(start_date, end_date)
```

```
.select([0,1,2,3,4,6,5,9], ['BB','BG','BR','BNIR','BSWIR_1','BSWIR_2','BT','pixel_qa'])
```

```
.filterMetadata('CLOUD_COVER', 'less_than', 90)
```

```
.filterBounds(postos_sed);
```

```
// LANDSAT 7
```

```
var col_Landsat_7 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LE07/C01/T1_SR")
```

```
.filterDate(start_date, end_date)
```

```
.select([0,1,2,3,4,6,5,9], ['BB','BG','BR','BNIR','BSWIR_1','BSWIR_2','BT','pixel_qa'])
```

```
.filterMetadata('CLOUD_COVER', 'less_than', 90)
```

```
.filterBounds(postos_sed);

// LANDSAT 8
var col_Landsat_8 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C01/T1_SR")
  .filterDate(start_date, end_date)
  .select([1,2,3,4,5,6,7,10], ['BB','BG','BR','BNIR','BSWIR_1','BSWIR_2','BT','pixel_qa'])
  .filterMetadata('CLOUD_COVER', 'less_than', 90)
  .filterBounds(postos_sed);

/* -----
FUNÇÕES PARA REMOÇÃO DE NUVENS */
// LANDSAT 5 E 7
var f_cloudMaskL5L7_SR = function(image) {
  var qa = image.select('pixel_qa');
  var cloud = qa.bitwiseAnd(1 << 5)
    .and(qa.bitwiseAnd(1 << 7))
    .or(qa.bitwiseAnd(1 << 3));
  var mask2 = image.mask().reduce(ee.Reducer.min());
  return image.updateMask(cloud.not()).updateMask(mask2);
};

// LANDSAT 8 .
var f_cloudMaskL8_SR = function (image) {
  var cloudShadowBitMask = (1 << 3);
  var cloudsBitMask = (1 << 5);
  var qa = image.select('pixel_qa');
  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudShadowBitMask).eq(0)
    .and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask).eq(0));
  return image.updateMask(mask);
};

// Aplica funções nas coleções
col_Landsat_5 = col_Landsat_5.map(f_cloudMaskL5L7_SR);
col_Landsat_7 = col_Landsat_7.map(f_cloudMaskL5L7_SR);
col_Landsat_8 = col_Landsat_8.map(f_cloudMaskL8_SR);

/* -----
JUNTAR EM COLEÇÃO ÚNICA */
var col_Landsat_tot = ee.ImageCollection(col_Landsat_5.merge(col_Landsat_7).merge(col_Landsat_8));
```

```
//print collection
print(col_Landsat_tot);
//cria coleção apenas com as bandas a serem extraídos os dados
var col_spec_indices = ee.ImageCollection(col_Landsat_tot).select('BG');
//-----
// FUNÇÃO PARA CRIAR TABELA E EXPORTAR DADOS DE AMOSTRAS PARA GOOGLE DRIVE
var function_table = function(image) {
  var dateStr = image.date();
  var dateNum = ee.Number.parse(dateStr.format("YYYYMMdd"));
  image = image.addBands(ee.Image(dateNum).rename('date'));
  return image.reduceRegions(postos_sed, ee.Reducer.first());
};
//aplicar a função e criar uma coleção com os dados
var table = col_spec_indices.map(function_table).flatten();
//exportar os dados em forma de tabela para o Google Drive
Export.table.toDrive({
  collection: table,
  description: 'series_temporais_bands',
  fileFormat: 'CSV',
  folder: 'Paraiba_sul',
});
//-----
// Define visualização dos parâmetros
Map.addLayer(col_Landsat_tot.mean(), {bands: ['BR', 'BG', 'BB'], min: 0, max: 2000, gamma: 2}, "Landsat Composition");
Map.addLayer(postos_sed, {}, "Postos_sedimento")
```

## Apêndice II – Parametros Fixos do Modelo Hidrológico MGG-IPH

Albedo												
Uso	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Flor_ras	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
Flor_Prof	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Agr_ras	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
Agr_prof	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
Cam_ras	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
Cam_prof	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
Varzeas	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
Sem_per	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
Agua	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08

Índice de Área foliar												
Uso	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Flor_ras	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Flor_Prof	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Agr_ras	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Agr_prof	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Cam_ras	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cam_prof	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Varzeas	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Sem_per	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Agua	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Altura das Árvores												
Uso	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Flor_ras	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Flor_Prof	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Agr_ras	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Agr_prof	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Cam_ras	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Cam_prof	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Varzeas	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Sem_per	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Agua	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

---

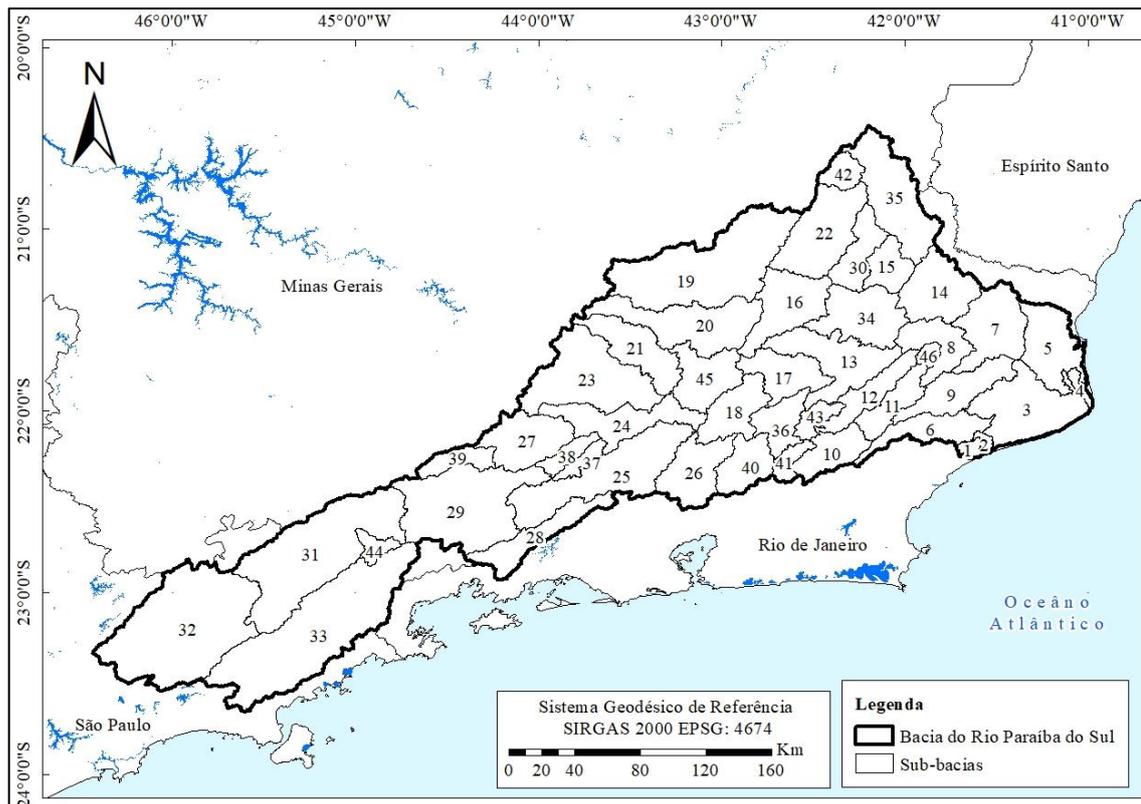
---

<b>Resistência da Superfície</b>												
<b>Uso</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
Flor_ras	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Flor_Prof	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Agr_ras	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Agr_prof	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Cam_ras	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Cam_prof	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Varzeas	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Sem_per	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

---

---

**Apêndice III – Parâmetros Calibráveis dos Modelos MGB-IPH e MGB-SED.**



Sub-bacias numeradas.

Sub-bacia 1												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	530	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.005
Flor_Prof	820	0.65	2.5	20	0.67	0	0.1	56.6	14.8	28.6	2.25	0.005
Agr_ras	530	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.05
Agr_prof	820	0.65	2.5	20	0.67	0	0.1	56.6	14.8	28.6	2.25	0.05
Cam_ras	530	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.01
Cam_prof	820	0.65	2.5	20	0.67	0	0.1	56.6	14.8	28.6	2.25	0.01
Varzeas	450	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	450	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	45											
CI	200											
CB	3600											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 2												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	530	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.005
Flor_Prof	820	0.65	2.5	20	0.67	0	0.1	56.6	14.8	28.6	2.25	0.005
Agr_ras	530	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.05
Agr_prof	820	0.65	2.5	20	0.67	0	0.1	56.6	14.8	28.6	2.25	0.05
Cam_ras	530	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.01
Cam_prof	820	0.65	2.5	20	0.67	0	0.1	56.6	14.8	28.6	2.25	0.01
Varzeas	450	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	450	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	45											
CI	200											
CB	3600											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 3												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	530	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.005
Flor_Prof	820	0.65	2.5	20	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.005
Agr_ras	530	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.05
Agr_prof	820	0.65	2.5	20	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.05
Cam_ras	530	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.01
Cam_prof	820	0.65	2.5	20	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.01
Varzeas	450	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	450	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	45											
CI	200											
CB	3600											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 4												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	530	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.005
Flor_Prof	820	0.65	2.5	20	0.67	0	0.1	53.8	12.1	34	1.5	0.005
Agr_ras	530	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.05
Agr_prof	820	0.65	2.5	20	0.67	0	0.1	53.8	12.1	34	1.5	0.05
Cam_ras	530	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.01
Cam_prof	820	0.65	2.5	20	0.67	0	0.1	53.8	12.1	34	1.5	0.01
Varzeas	450	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	450	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	45											
CI	200											
CB	3600											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 5												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	530	0.75	0.3	5	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.004
Flor_Prof	820	0.65	0.4	8	0.67	0	0.1	43.65	12.1	44.2	1.58	0.004
Agr_ras	530	0.75	0.3	5	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.05
Agr_prof	820	0.65	0.5	8	0.67	0	0.1	43.65	12.1	44.2	1.58	0.05
Cam_ras	530	0.75	0.3	5	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.01
Cam_prof	820	0.65	0.5	8	0.67	0	0.1	43.65	12.1	44.2	1.58	0.01
Varzeas	450	0.75	0.3	5	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	450	0.75	0.3	8	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	45											
CI	200											
CB	3600											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 6												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	530	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	35.7	29.3	35.1	3.28	0.005
Flor_Prof	820	0.65	2.5	20	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.005
Agr_ras	530	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	35.7	29.3	35.1	3.28	0.05
Agr_prof	820	0.65	2.5	20	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.05
Cam_ras	530	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	35.7	29.3	35.1	3.28	0.01
Cam_prof	820	0.65	2.5	20	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.01
Varzeas	450	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	450	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	45											
CI	200											
CB	3600											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 7												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	500	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	67.3	11.2	21.5	0.63	0.004
Flor_Prof	900	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.004
Agr_ras	500	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	67.3	11.2	21.5	0.63	0.0464
Agr_prof	900	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.0464
Cam_ras	500	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	67.3	11.2	21.5	0.63	0.01
Cam_prof	900	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.01
Varzeas	300	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	300	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	45											
CI	200											
CB	3000											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 8												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	200	0.85	4.5	22	0.67	0	0.1	72.45	9.9	17.7	0.51	0.004
Flor_Prof	300	0.65	3.5	18	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.004
Agr_ras	200	0.85	4.5	22	0.67	0	0.1	72.45	9.9	17.7	0.51	0.0544
Agr_prof	300	0.65	3.4	18	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.0544
Cam_ras	200	0.85	4.5	22	0.67	0	0.1	72.45	9.9	17.7	0.51	0.01
Cam_prof	250	0.65	3.5	18	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.01
Varzeas	70	0.85	4.5	22	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	70	0.85	4.5	22	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	1											
CI	150											
CB	10000											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 9												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	530	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	53.233	13.9	32.9	1.59	0.004
Flor_Prof	820	0.65	2.5	20	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.004
Agr_ras	530	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	53.233	13.9	32.9	1.59	0.0544
Agr_prof	820	0.65	2.5	20	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.0544
Cam_ras	530	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	53.233	13.9	32.9	1.59	0.01
Cam_prof	820	0.65	2.5	20	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.01
Varzeas	450	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	450	0.75	1.5	15	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	45											
CI	200											
CB	3600											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 10												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	1300	0.3	0.8	25	0.67	0	0.1	35.7	29.3	35.1	3.28	0.005
Flor_Prof	1600	0.2	0.6	20	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.005
Agr_ras	1300	0.3	0.8	25	0.67	0	0.1	35.7	29.3	35.1	3.28	0.0514
Agr_prof	1600	0.2	0.6	20	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.0514
Cam_ras	1300	0.3	0.8	25	0.67	0	0.1	35.7	29.3	35.1	3.28	0.01
Cam_prof	1550	0.2	0.6	20	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.01
Varzeas	900	0.3	0.8	25	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	900	0.3	0.8	25	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	55											
CI	250											
CB	6000											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 11												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	530	0.4	1.5	15	0.67	0	0.1	67.3	11.2	21.5	0.63	0.005
Flor_Prof	820	0.3	2.5	20	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.005
Agr_ras	530	0.4	1.5	15	0.67	0	0.1	67.3	11.2	21.5	0.63	0.0514
Agr_prof	820	0.3	2.5	20	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.0514
Cam_ras	530	0.4	1.5	15	0.67	0	0.1	67.3	11.2	21.5	0.63	0.01
Cam_prof	820	0.3	2.5	20	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.01
Varzeas	450	0.4	1.5	15	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	450	0.4	1.5	15	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	45											
CI	200											
CB	3600											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 12												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	900	0.19	0.35	6	0.67	0	0.1	67.3	11.2	21.5	0.63	0.005
Flor_Prof	1100	0.17	0.3	5	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.005
Agr_ras	900	0.19	0.35	6	0.67	0	0.1	67.3	11.2	21.5	0.63	0.0514
Agr_prof	1100	0.17	0.3	5	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.0514
Cam_ras	900	0.19	0.35	6	0.67	0	0.1	67.3	11.2	21.5	0.63	0.01
Cam_prof	1100	0.17	0.3	5	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.01
Varzeas	850	0.19	0.36	6	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	850	0.19	0.36	6	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	90											
CI	250											
CB	11000											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 13												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	200	0.85	4.5	22	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.005
Flor_Prof	300	0.65	3.5	18	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.005
Agr_ras	200	0.85	4.5	22	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.0514
Agr_prof	300	0.65	3.4	18	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.0514
Cam_ras	200	0.85	4.5	22	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.01
Cam_prof	250	0.65	3.5	18	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.01
Varzeas	70	0.85	4.5	22	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	70	0.85	4.5	22	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	1											
CI	150											
CB	10000											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 14												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	500	0.5	0.01	0.6	0.67	0	0.1	72.45	9.9	17.7	0.51	0.005
Flor_Prof	900	0.5	0.01	0.6	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.005
Agr_ras	500	0.5	0.01	0.6	0.67	0	0.1	72.45	9.9	17.7	0.51	0.0714
Agr_prof	900	0.5	0.01	0.6	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.0714
Cam_ras	500	0.5	0.01	0.6	0.67	0	0.1	72.45	9.9	17.7	0.51	0.01
Cam_prof	900	0.5	0.01	0.6	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.01
Varzeas	300	0.5	0.01	0.6	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	300	0.5	0.01	0.6	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	60											
CI	200											
CB	3000											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 15												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	500	0.5	0.01	0.2	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.005
Flor_Prof	900	0.5	0.01	0.2	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.005
Agr_ras	500	0.5	0.01	0.2	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.0614
Agr_prof	900	0.5	0.01	0.2	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.0614
Cam_ras	500	0.5	0.01	0.2	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.01
Cam_prof	900	0.5	0.01	0.2	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.01
Varzeas	300	0.5	0.01	0.2	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	300	0.5	0.01	0.2	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	60											
CI	200											
CB	3000											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 16												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	700	1.6	1.5	20	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.0042
Flor_Prof	1000	1.4	1	15	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.0042
Agr_ras	700	1.6	1.5	20	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.042
Agr_prof	1000	1.4	1	15	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.042
Cam_ras	700	1.6	1.5	20	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.011
Cam_prof	1000	1.4	1	15	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.011
Varzeas	600	1.6	1.5	20	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.0015
Sem_per	600	1.6	1.5	20	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.0015
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	70											
CI	320											
CB	3400											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 17												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	200	0.85	4.5	22	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.005
Flor_Prof	300	0.65	3.5	18	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.005
Agr_ras	200	0.85	4.5	22	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.0544
Agr_prof	300	0.65	3.4	18	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.0544
Cam_ras	200	0.85	4.5	22	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.01
Cam_prof	250	0.65	3.5	18	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.01
Varzeas	70	0.85	4.5	22	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.002
Sem_per	70	0.85	4.5	22	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	1											
CI	150											
CB	10000											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 18												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	200	0.85	4.5	22	0.67	0	0.1	72.45	9.9	17.7	0.51	0.005
Flor_Prof	300	0.65	4.5	18	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.005
Agr_ras	200	0.85	5.5	22	0.67	0	0.1	72.45	9.9	17.7	0.51	0.0504
Agr_prof	300	0.65	4.5	18	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.0504
Cam_ras	200	0.85	5.5	22	0.67	0	0.1	72.45	9.9	17.7	0.51	0.01
Cam_prof	250	0.65	4.5	18	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.01
Varzeas	70	0.85	5.5	22	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.002
Sem_per	70	0.85	5.5	22	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	1											
CI	150											
CB	10000											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 19												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	920	0.65	4	23	0.67	0	0.1	56.65	18.95	24.5	1.835	0.0045
Flor_Prof	1190	0.55	3	18	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.0045
Agr_ras	900	0.65	4	23	0.67	0	0.1	56.65	18.95	24.5	1.835	0.05
Agr_prof	1190	0.55	3	18	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.05
Cam_ras	900	0.65	4	23	0.67	0	0.1	56.65	18.95	24.5	1.835	0.01
Cam_prof	1190	0.55	3	18	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.01
Varzeas	930	0.65	4	23	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.002
Sem_per	630	0.65	4	23	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.002
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	55											
CI	220											
CB	4000											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 20												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	700	1.6	2	20	0.67	0	0.1	56.65	18.95	24.5	1.835	0.0045
Flor_Prof	1000	1.4	1.5	18	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.0045
Agr_ras	700	1.6	2	20	0.67	0	0.1	56.65	18.95	24.5	1.835	0.05
Agr_prof	1000	1.4	1.5	18	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.05
Cam_ras	700	1.6	2	20	0.67	0	0.1	56.65	18.95	24.5	1.835	0.014
Cam_prof	1000	1.4	1.5	18	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.014
Varzeas	600	1.6	2	20	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.002
Sem_per	600	1.6	2	20	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.002
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	70											
CI	320											
CB	3000											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 21												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	900	0.3	4	20	0.67	0	0.1	35.7	29.3	35.1	3.28	0.0053
Flor_Prof	1200	0.3	3	15	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.0053
Agr_ras	900	0.3	4	20	0.67	0	0.1	35.7	29.3	35.1	3.28	0.09
Agr_prof	1200	0.3	3	15	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.09
Cam_ras	900	0.3	4	20	0.67	0	0.1	35.7	29.3	35.1	3.28	0.034
Cam_prof	1200	0.3	3	15	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.034
Varzeas	600	0.3	4	20	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.002
Sem_per	600	0.3	4	20	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.002
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	30											
CI	200											
CB	8500											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 22												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	100	0.45	8.5	35	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.005
Flor_Prof	290	0.4	7.5	30	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.005
Agr_ras	120	0.45	8.5	35	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.0764
Agr_prof	290	0.4	7.5	30	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.0764
Cam_ras	120	0.45	8.5	35	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.042
Cam_prof	290	0.5	7.5	30	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.042
Varzeas	120	0.45	8.5	35	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	120	0.45	8.5	35	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	65											
CI	200											
CB	3200											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 23												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	980	0.5	2.2	18	0.67	0	0.1	56.65	18.95	24.5	1.835	0.005
Flor_Prof	1400	0.45	2	15	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.005
Agr_ras	9800	0.5	2.2	18	0.67	0	0.1	56.65	18.95	24.5	1.835	0.0564
Agr_prof	1400	0.45	2	15	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.0564
Cam_ras	980	0.5	2.2	18	0.67	0	0.1	56.65	18.95	24.5	1.835	0.01
Cam_prof	1400	0.45	2	15	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.01
Varzeas	1100	0.5	2.2	18	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	1100	0.5	2.2	18	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	80											
CI	300											
CB	3300											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 24												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	350	0.4	4.8	35	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.005
Flor_Prof	650	0.3	3.4	30	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.005
Agr_ras	350	0.4	4	35	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.0594
Agr_prof	650	0.3	3.4	30	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.0594
Cam_ras	350	0.4	4	35	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.014
Cam_prof	650	0.3	3.4	30	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.014
Varzeas	250	0.4	4	35	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.002
Sem_per	250	0.4	4	35	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	5											
CI	200											
CB	4000											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 25												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	500	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	72.45	9.9	17.7	0.51	0.006
Flor_Prof	900	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.006
Agr_ras	500	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	72.45	9.9	17.7	0.51	0.0504
Agr_prof	900	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.0504
Cam_ras	500	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	72.45	9.9	17.7	0.51	0.042
Cam_prof	900	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.042
Varzeas	300	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	300	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	45											
CI	200											
CB	3000											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 26												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	300	0.9	6	20	0.67	0	0.1	72.45	9.9	17.7	0.51	0.005
Flor_Prof	400	0.8	4	20	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.005
Agr_ras	300	0.9	6	20	0.67	0	0.1	72.45	9.9	17.7	0.51	0.0504
Agr_prof	400	0.8	4	20	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.0504
Cam_ras	300	0.9	6	20	0.67	0	0.1	72.45	9.9	17.7	0.51	0.01
Cam_prof	400	0.8	4	20	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.01
Varzeas	200	0.9	6	20	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	200	0.9	6	20	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	55											
CI	200											
CB	2400											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 27												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	350	0.25	4	20	0.67	0	0.1	35.7	29.3	35.1	3.28	0.005
Flor_Prof	650	0.2	3	15	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.005
Agr_ras	350	0.25	4	20	0.67	0	0.1	35.7	29.3	35.1	3.28	0.0594
Agr_prof	650	0.2	3	15	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.0594
Cam_ras	350	0.25	4	20	0.67	0	0.1	35.7	29.3	35.1	3.28	0.018
Cam_prof	650	0.2	3	15	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.018
Varzeas	250	0.25	4	20	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	250	0.25	4	20	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	5											
CI	250											
CB	3200											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 28												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	500	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.004
Flor_Prof	900	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.004
Agr_ras	500	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.0464
Agr_prof	900	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.0464
Cam_ras	500	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.01
Cam_prof	900	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.01
Varzeas	300	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.002
Sem_per	300	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	45											
CI	200											
CB	3000											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 29												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	500	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.004
Flor_Prof	900	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.004
Agr_ras	500	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.0494
Agr_prof	900	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.0494
Cam_ras	500	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.009
Cam_prof	900	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.009
Varzeas	300	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.002
Sem_per	300	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	45											
CI	200											
CB	3000											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 30												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	450	0.4	0.01	0.1	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.006
Flor_Prof	600	0.4	0.01	0.1	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.006
Agr_ras	450	0.4	0.01	0.1	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.0564
Agr_prof	600	0.4	0.01	0.1	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.0564
Cam_ras	450	0.4	0.01	0.1	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.018
Cam_prof	600	0.4	0.01	0.1	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.018
Varzeas	330	0.4	0.01	0.1	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	330	0.4	0.01	0.1	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	75											
CI	300											
CB	700											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 31												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	500	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.004
Flor_Prof	900	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	47.967	13	39	1.8	0.004
Agr_ras	500	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.0494
Agr_prof	900	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	47.967	13	39	1.8	0.0494
Cam_ras	500	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.009
Cam_prof	900	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	47.967	13	39	1.8	0.009
Varzeas	300	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.002
Sem_per	300	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	45											
CI	200											
CB	3000											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 32												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	500	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.004
Flor_Prof	900	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	47.967	13	39	1.8	0.004
Agr_ras	500	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.0494
Agr_prof	900	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	47.967	13	39	1.8	0.0494
Cam_ras	500	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.009
Cam_prof	900	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	47.967	13	39	1.8	0.009
Varzeas	300	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.002
Sem_per	300	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	45											
CI	200											
CB	3000											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 33												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	500	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	35.7	29.3	35.1	3.28	0.004
Flor_Prof	900	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.004
Agr_ras	500	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	35.7	29.3	35.1	3.28	0.0494
Agr_prof	900	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.0494
Cam_ras	500	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	35.7	29.3	35.1	3.28	0.009
Cam_prof	900	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.009
Varzeas	300	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.002
Sem_per	300	0.5	0.01	0.5	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	45											
CI	200											
CB	3000											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 34												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	200	0.85	4.5	22	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.005
Flor_Prof	300	0.65	3.5	18	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.005
Agr_ras	200	0.85	4.5	22	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.0524
Agr_prof	300	0.65	3.4	18	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.0524
Cam_ras	200	0.85	4.5	22	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.01
Cam_prof	250	0.65	3.5	18	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.01
Varzeas	70	0.85	4.5	22	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	70	0.85	4.5	22	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	1											
CI	150											
CB	10000											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 35												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	100	0.2	4	10	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.005
Flor_Prof	280	0.3	4.4	15	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.005
Agr_ras	100		4	10	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.0764
Agr_prof	280	0.3	4.4	15	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.0764
Cam_ras	100	0.2	4	10	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.01
Cam_prof	280	0.3	4.4	15	0.67	0	0.1	51.55	13.45	35.05	1.26	0.01
Varzeas	100	0.2	4	10	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.002
Sem_per	100	0.2	4	10	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	45											
CI	200											
CB	2800											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 36												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	230	0.15	3	20	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.005
Flor_Prof	360	0.15	6	25	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.005
Agr_ras	230	0.15	4	20	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.0574
Agr_prof	360	0.15	6	25	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.0574
Cam_ras	230	0.15	4	20	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.01
Cam_prof	230	0.15	6	25	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.01
Varzeas	150	0.15	4	20	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.002
Sem_per	150	0.15	6	20	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	45											
CI	200											
CB	4000											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 37												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	500	0.4	0.65	5	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.005
Flor_Prof	700	0.4	0.75	6	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.005
Agr_ras	500	0.4	0.65	5	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.0564
Agr_prof	700	0.4	0.75	6	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.0564
Cam_ras	500	0.4	0.65	5	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.01
Cam_prof	700	0.4	0.75	6	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.01
Varzeas	300	0.4	0.65	5	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	300	0.4	0.65	5	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	55											
CI	10											
CB	6000											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 38												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	280	0.45	3.5	6	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.005
Flor_Prof	640	0.35	3	5	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.005
Agr_ras	280	0.45	3.5	6	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.0564
Agr_prof	640	0.35	3	5	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.0564
Cam_ras	280	0.45	3.5	6	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.01
Cam_prof	640	0.35	3	5	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.01
Varzeas	180	0.45	3.5	6	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	180	0.45	3.5	6	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	40											
CI	300											
CB	3300											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 39												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	220	0.3	11	50	0.67	0	0.1	35.7	29.3	35.1	3.28	0.005
Flor_Prof	420	0.35	11	50	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.005
Agr_ras	220	0.3	12	50	0.67	0	0.1	35.7	29.3	35.1	3.28	0.0594
Agr_prof	420	0.35	11	50	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.0594
Cam_ras	220	0.3	12	50	0.67	0	0.1	35.7	29.3	35.1	3.28	0.018
Cam_prof	420	0.35	11	50	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.018
Varzeas	220	0.35	11	50	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	220	0.35	11	50	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	40											
CI	300											
CB	2300											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 40												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	1500	0.1	0.4	2	0.67	0	0.1	56.65	18.95	24.5	1.835	0.005
Flor_Prof	2000	0.1	0.4	2	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.005
Agr_ras	1500	0.1	0.4	2	0.67	0	0.1	56.65	18.95	24.5	1.835	0.0564
Agr_prof	2000	0.1	0.4	2	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.0564
Cam_ras	1500	0.1	0.4	2	0.67	0	0.1	56.65	18.95	24.5	1.835	0.01
Cam_prof	2000	0.1	0.4	2	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.01
Varzeas	1000	0.1	0.4	2	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	1000	0.1	0.4	2	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	55											
CI	90											
CB	5200											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 41												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	300	2	7	45	0.67	0	0.1	35.7	29.3	35.1	3.28	0.005
Flor_Prof	480	1.8	6.5	40	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.005
Agr_ras	300	2	7	45	0.67	0	0.1	35.7	29.3	35.1	3.28	0.0564
Agr_prof	480	1.8	6.5	40	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.0564
Cam_ras	300	2	7	45	0.67	0	0.1	35.7	29.3	35.1	3.28	0.01
Cam_prof	480	1.8	6.5	40	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.01
Varzeas	230	1.8	7	45	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	230	1.8	7	45	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	85											
CI	150											
CB	1300											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 42												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	100	0.35	6.5	30	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.005
Flor_Prof	290	0.45	7.5	25	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.005
Agr_ras	100	0.35	6.5	30	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.0564
Agr_prof	290	0.45	7.5	25	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.0564
Cam_ras	100	0.35	6.5	30	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.01
Cam_prof	290	0.45	7.5	25	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.01
Varzeas	100	0.35	6.5	30	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	100	0.35	6.5	30	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	45											
CI	200											
CB	2200											
QB_M3/SKM2	0.01											

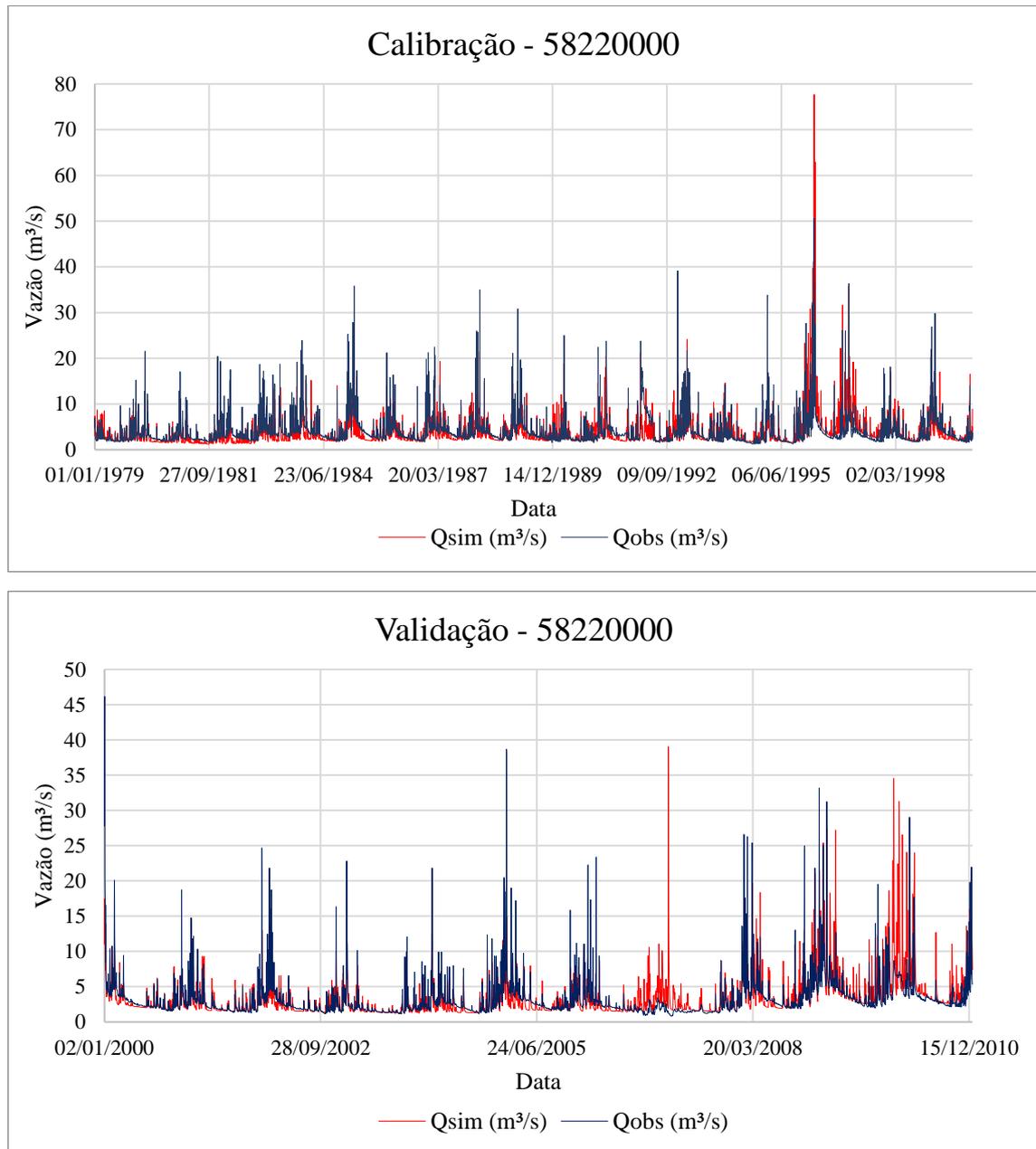
Sub-bacia 43												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	370	0.43	2	15	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.005
Flor_Prof	620	0.33	2.5	20	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.005
Agr_ras	370	0.43	2	15	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.0564
Agr_prof	620	0.33	2.5	20	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.0564
Cam_ras	370	0.43	2	15	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.01
Cam_prof	620	0.33	2.5	20	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.01
Varzeas	310	0.43	2	15	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	310	0.43	2	15	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	49											
CI	500											
CB	7200											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 44												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	1950	0.3	1.5	4	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.004
Flor_Prof	2500	0.3	1.4	3	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.004
Agr_ras	1950	0.3	1.5	4	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.0464
Agr_prof	2600	0.3	1.4	3	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.0464
Cam_ras	1950	0.3	1.5	4	0.67	0	0.1	60.2	16.3	23.5	1.4	0.01
Cam_prof	2600	0.3	1.4	3	0.67	0	0.1	44.15	16.1	39.75	2.085	0.01
Varzeas	1600	0.3	1.5	4	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	1600	0.3	1.5	4	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	45											
CI	250											
CB	6000											
QB_M3/SKM2	0.01											

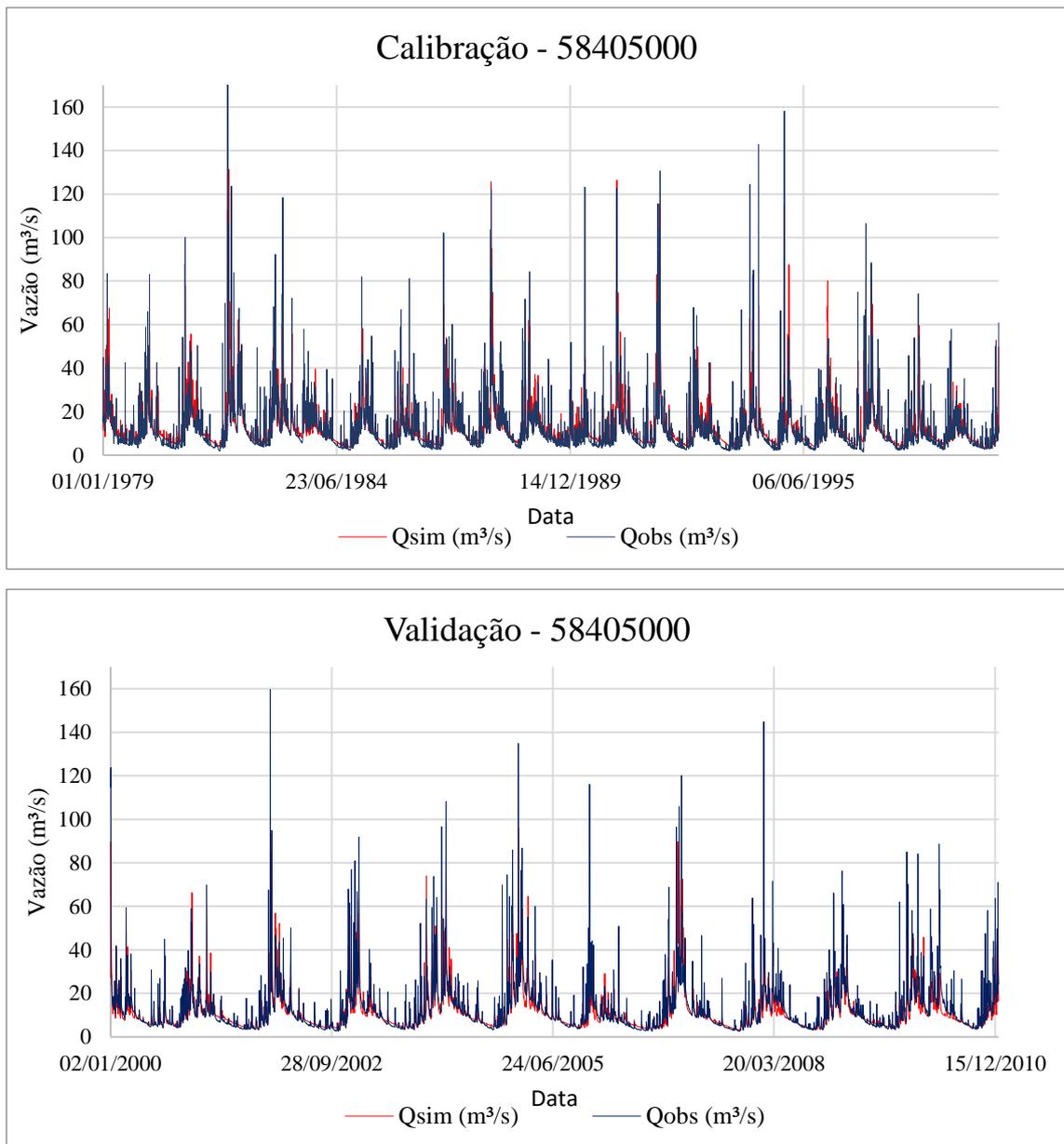
Sub-bacia 45												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	180	0.4	5.2	30	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.005
Flor_Prof	380	0.3	4.8	25	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.005
Agr_ras	180	0.4	5.2	30	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.0564
Agr_prof	380	0.3	4.8	25	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.0564
Cam_ras	180	0.4	5.2	30	0.67	0	0.1	77.6	8.6	13.9	0.39	0.01
Cam_prof	380	0.3	4.8	25	0.67	0	0.1	31.7	17.4	50.9	1.92	0.01
Varzeas	130	0.4	5.2	30	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	130	0.4	5.2	30	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	45											
CI	40											
CB	3300											
QB_M3/SKM2	0.01											

Sub-bacia 46												
uso	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc	Areia %	Silte %	Argila %	orgC %	C
Flor_ras	300	0.05	0.05	2	0.67	0	0.1	67.3	11.2	21.5	0.63	0.005
Flor_Prof	600	0.05	0.05	2	0.67	0	0.1	71.4	9.5	19.2	0.6	0.005
Agr_ras	300	0.05	0.05	2	0.67	0	0.1	67.3	11.2	21.5	0.63	0.0574
Agr_prof	600	0.05	0.05	2	0.67	0	0.1	71.4	9.5	19.2	0.6	0.0574
Cam_ras	300	0.05	0.05	2	0.67	0	0.1	67.3	11.2	21.5	0.63	0.01
Cam_prof	600	0.05	0.05	2	0.67	0	0.1	71.4	9.5	19.2	0.6	0.01
Varzeas	200	0.05	0.05	2	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Sem_per	200	0.05	0.05	2	0.67	0	0.1	21.9	20.8	57.3	2.92	0.001
Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CS	1											
CI	200											
CB	2400											
QB_M3/SKM2	0.01											

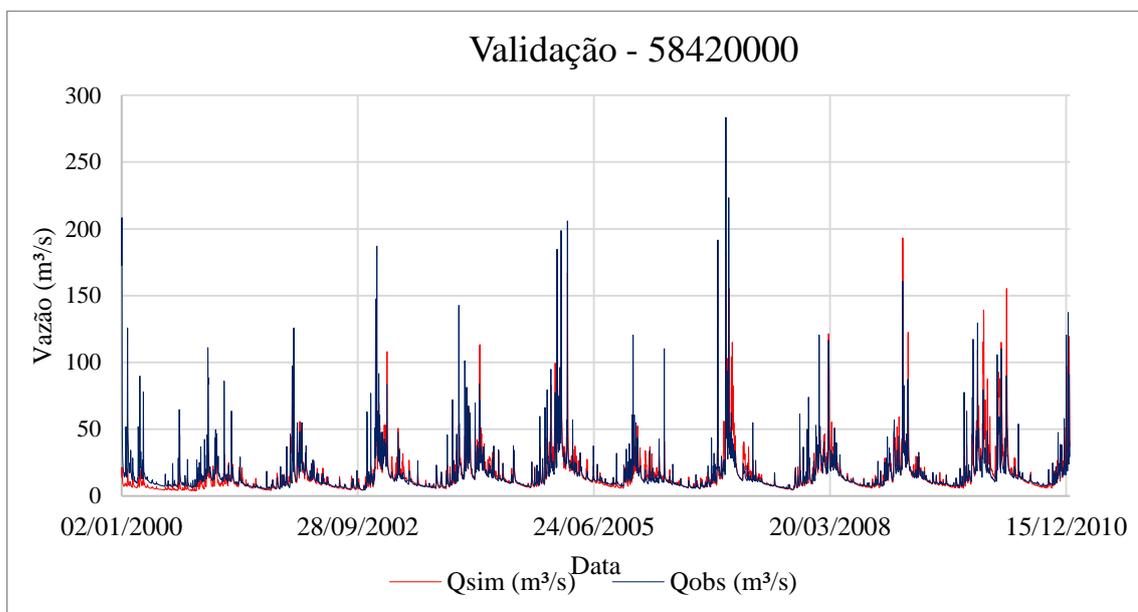
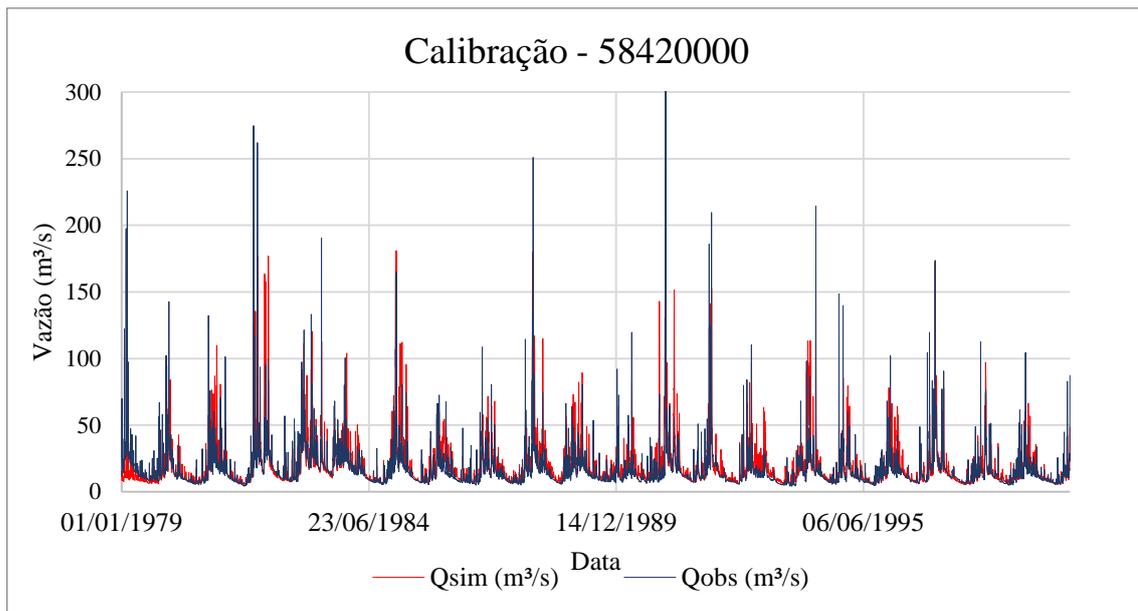
### Apêndice III - Hidrogramas de Calibração e Validação do Modelo Hidrológico MGB-IPH



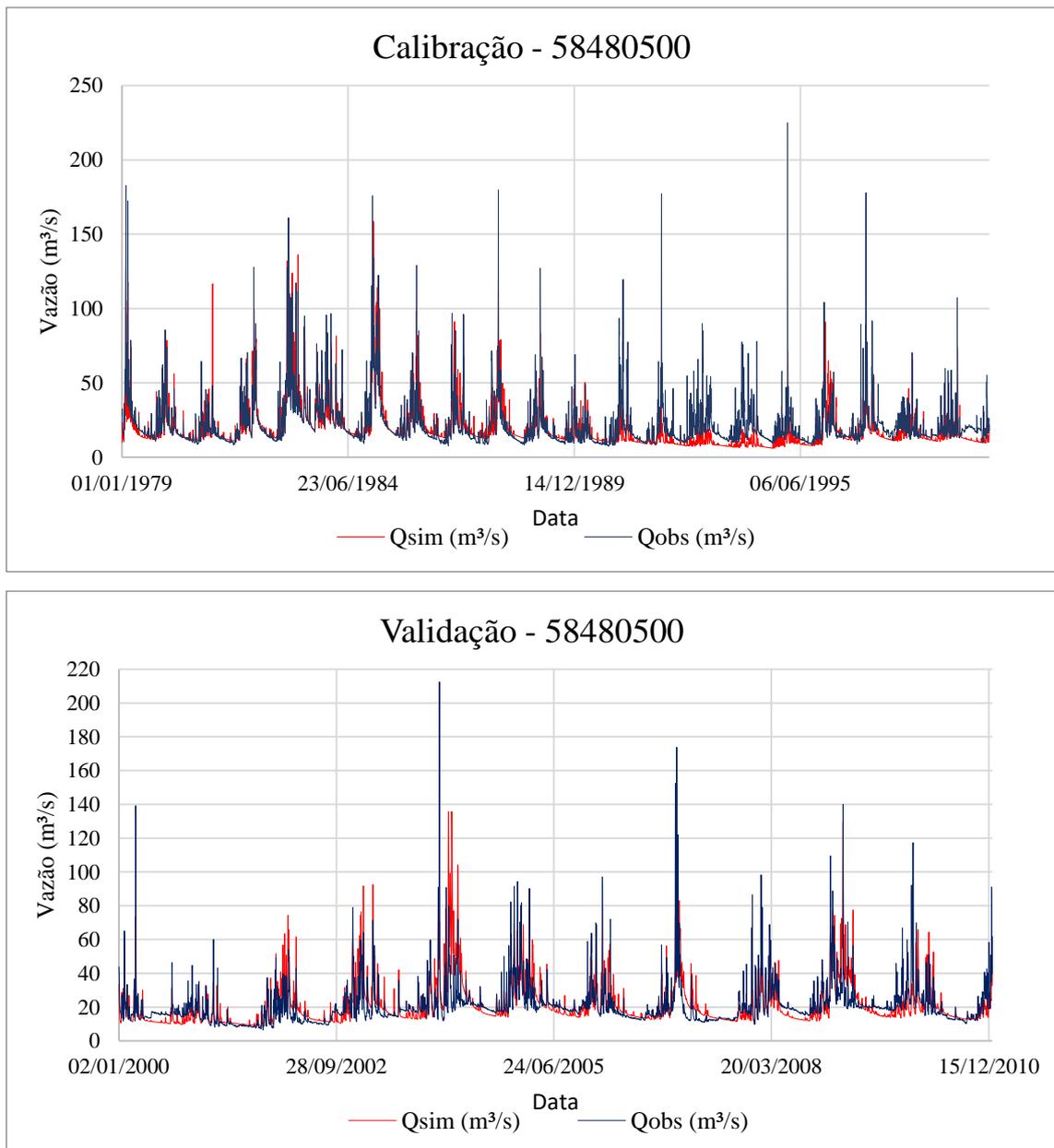
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58220000.*



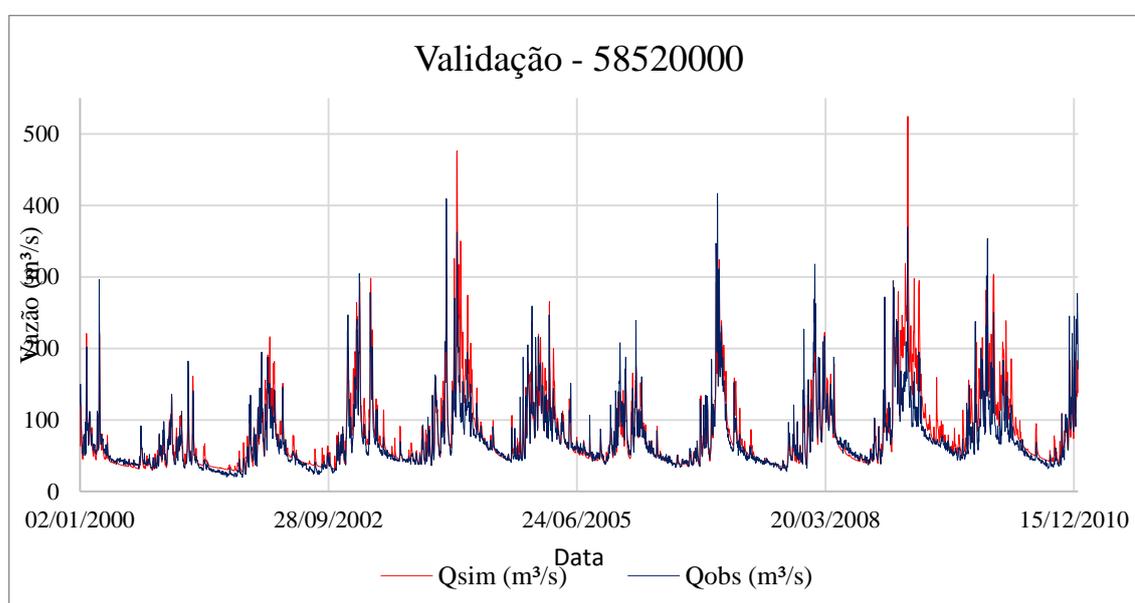
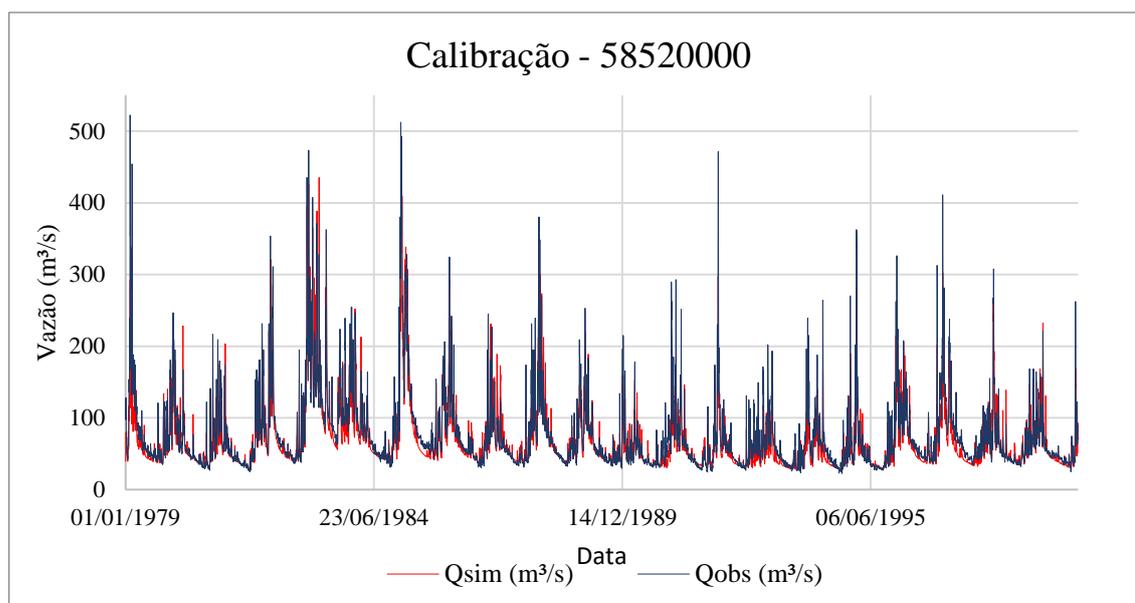
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58405000.*



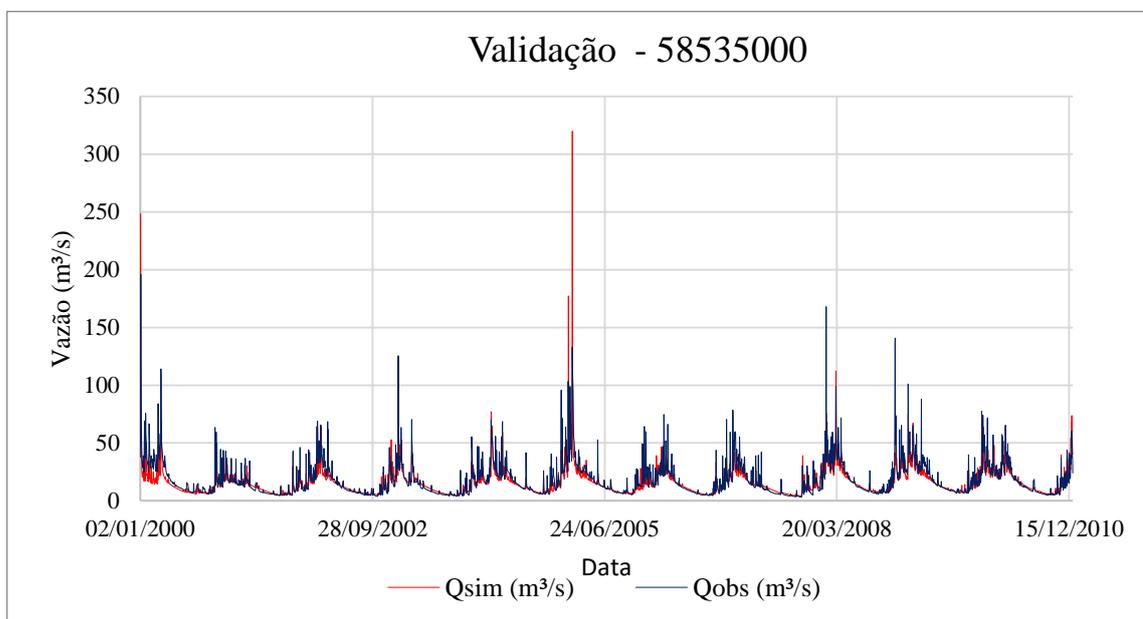
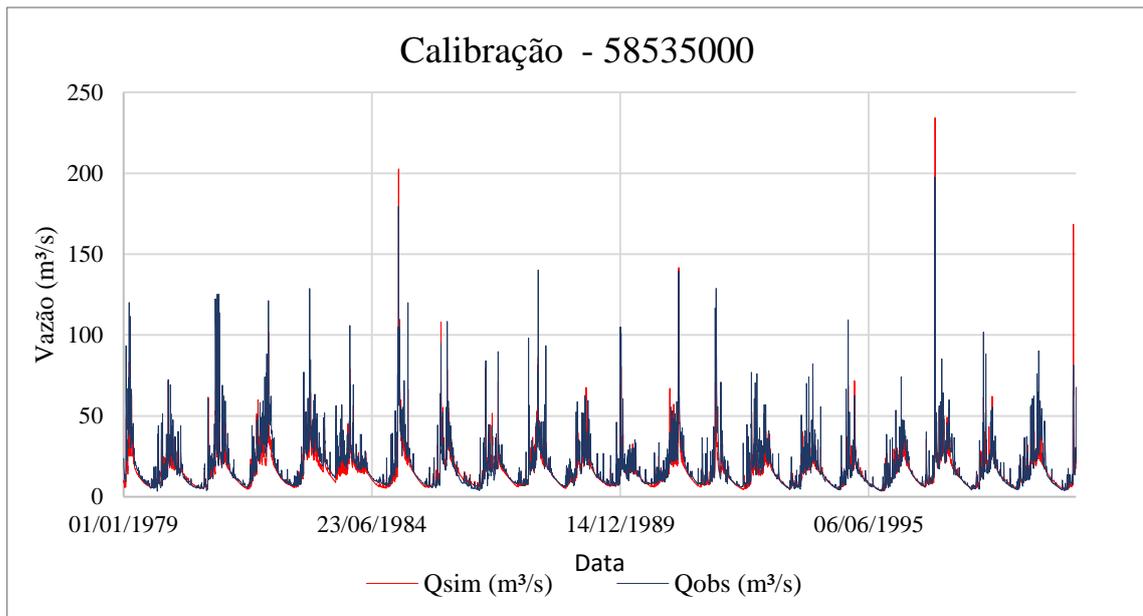
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58420000.*



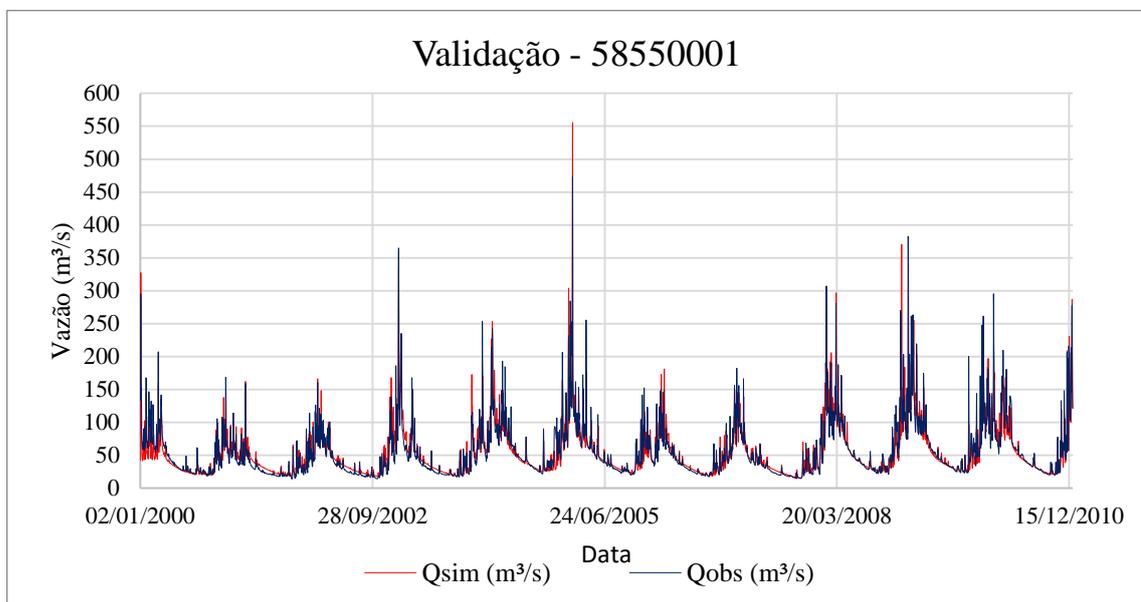
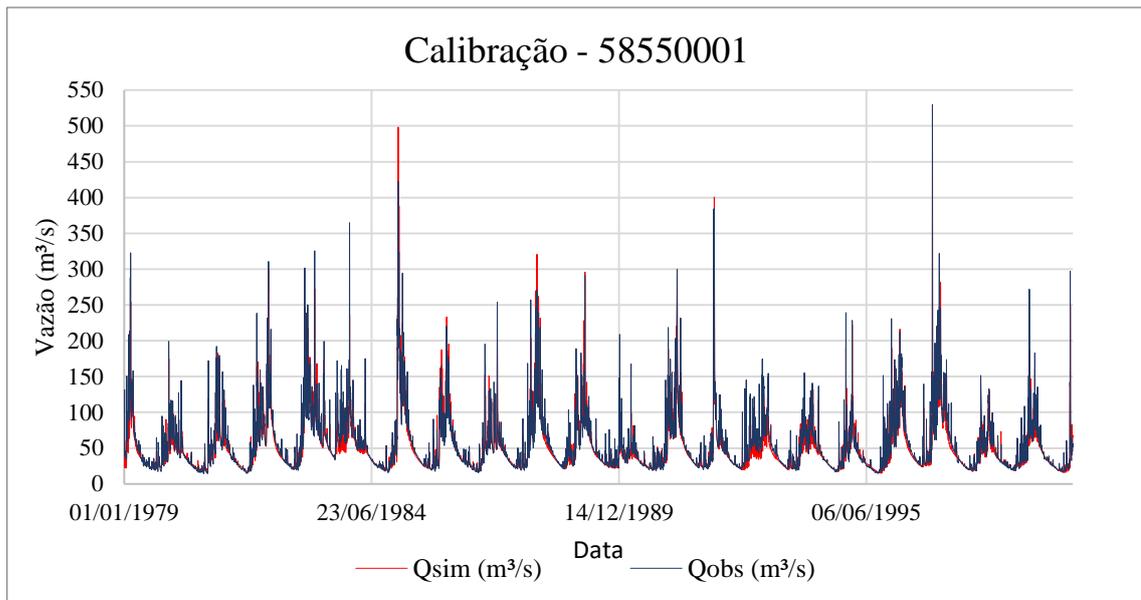
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58480500.*



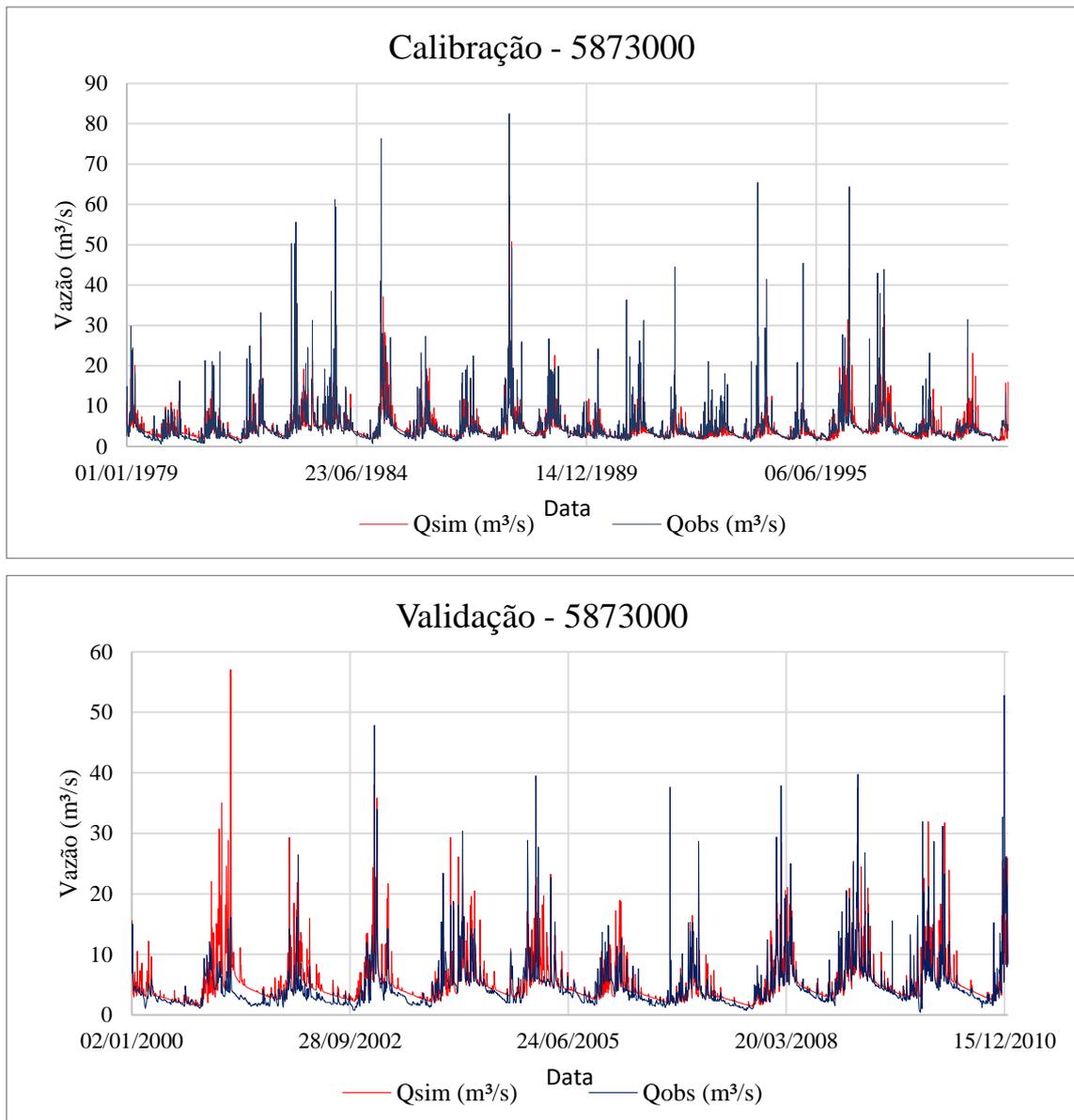
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58520000.*



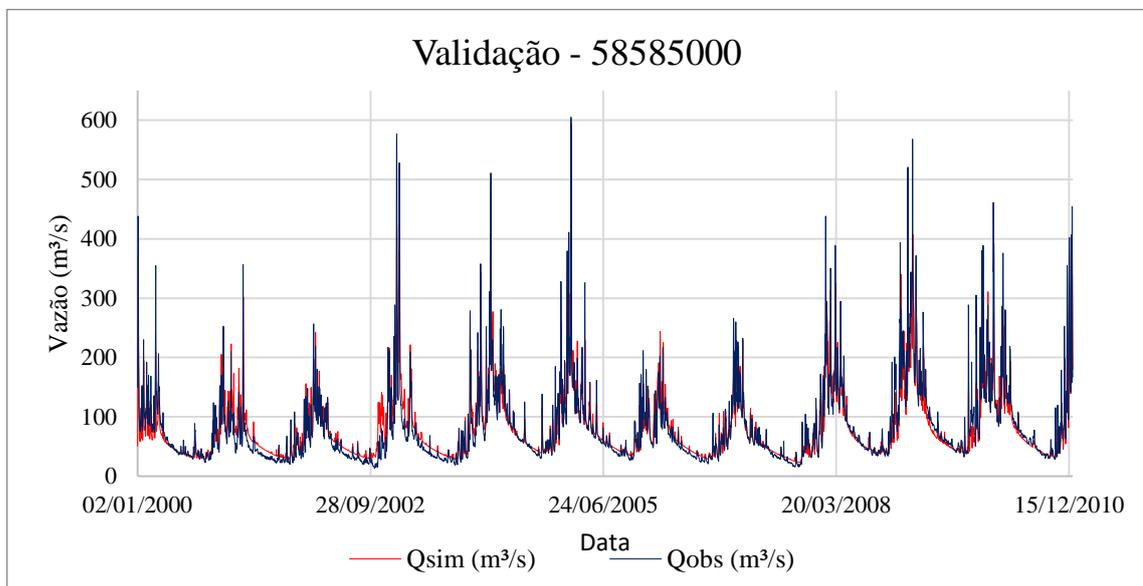
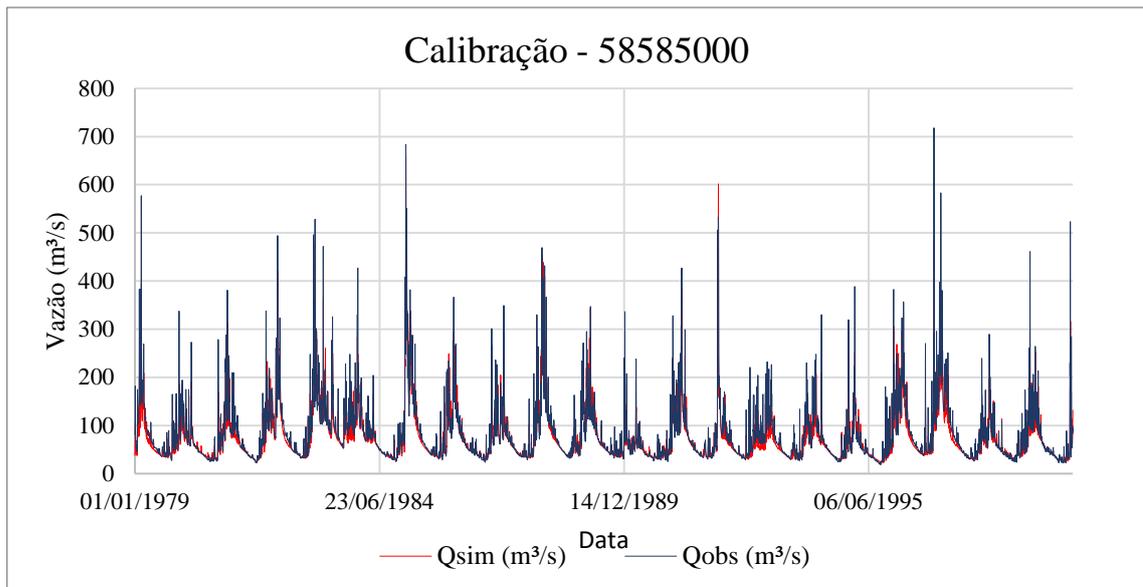
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58535000.*



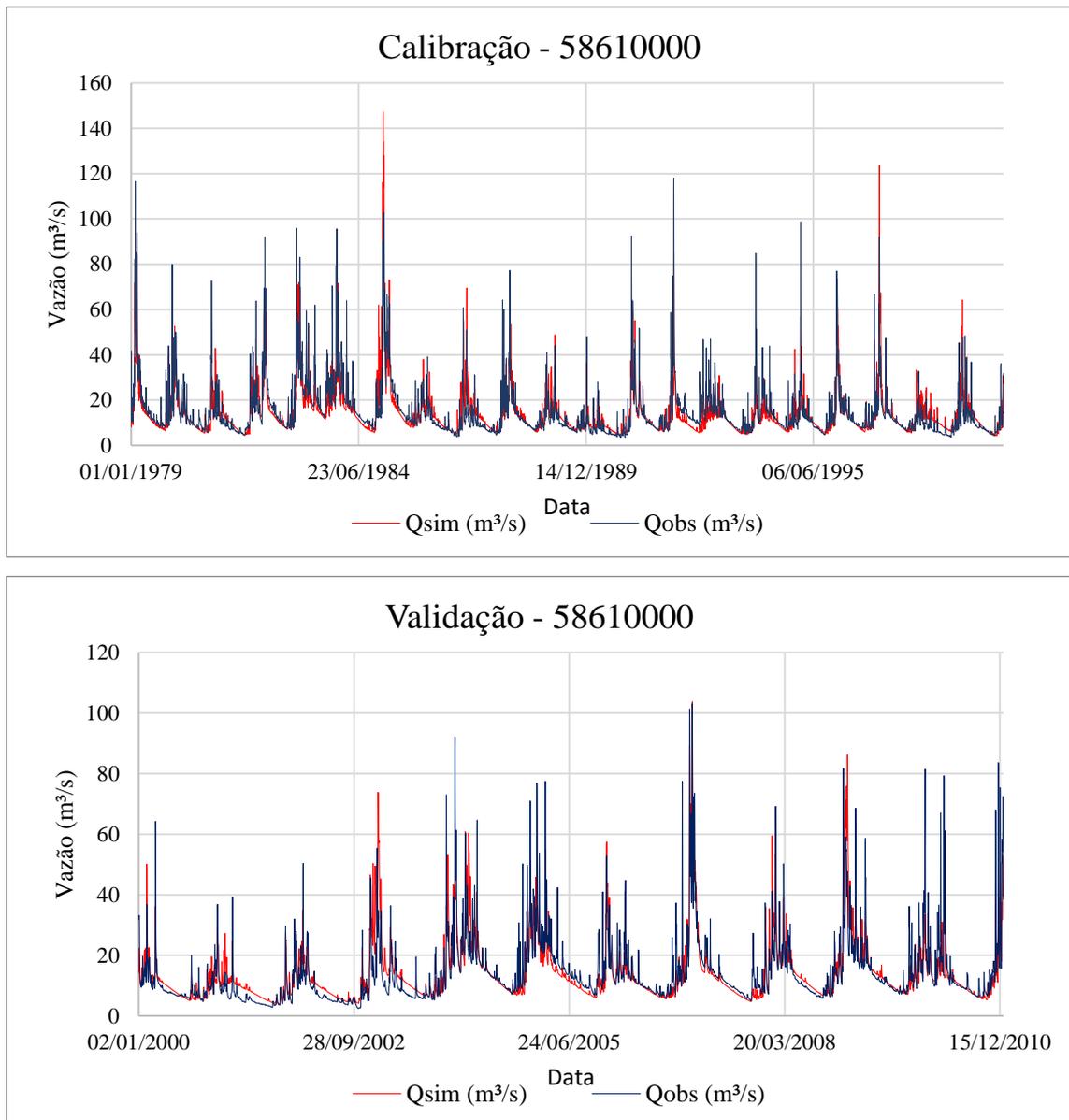
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58550001.*



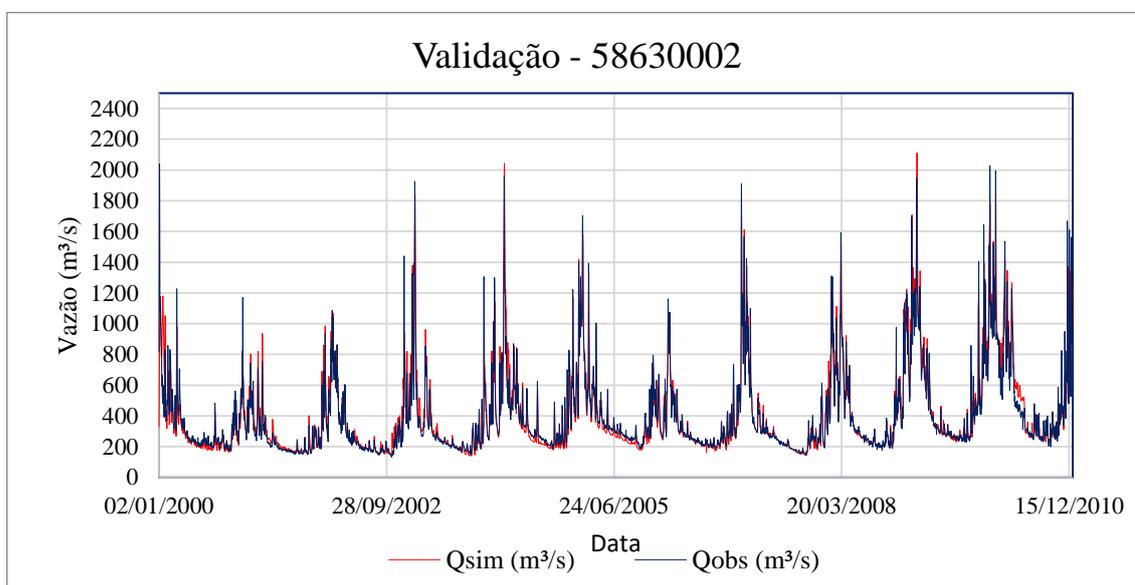
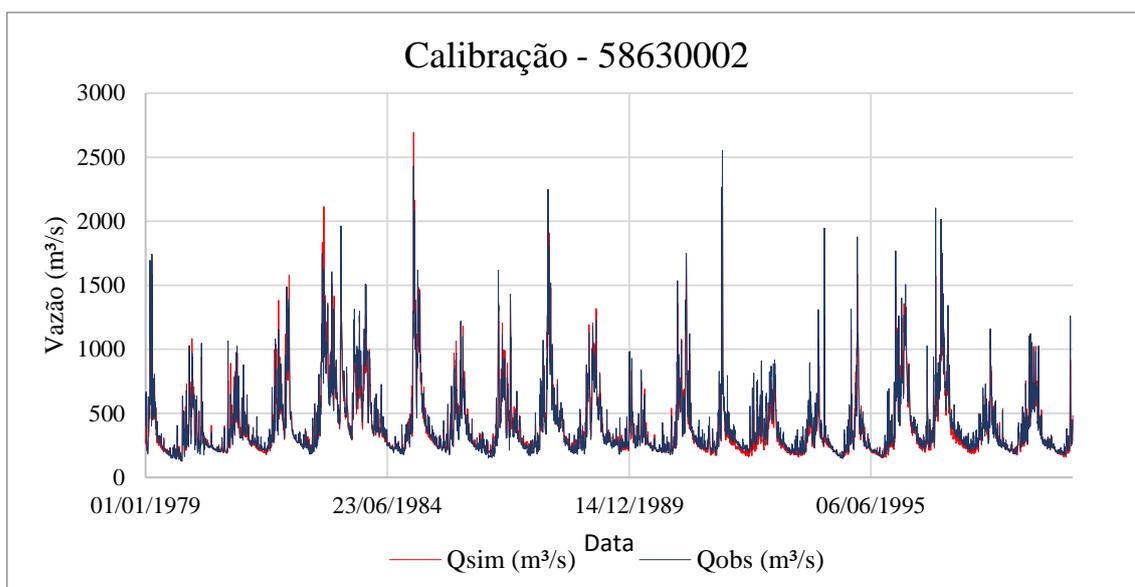
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58730000.*



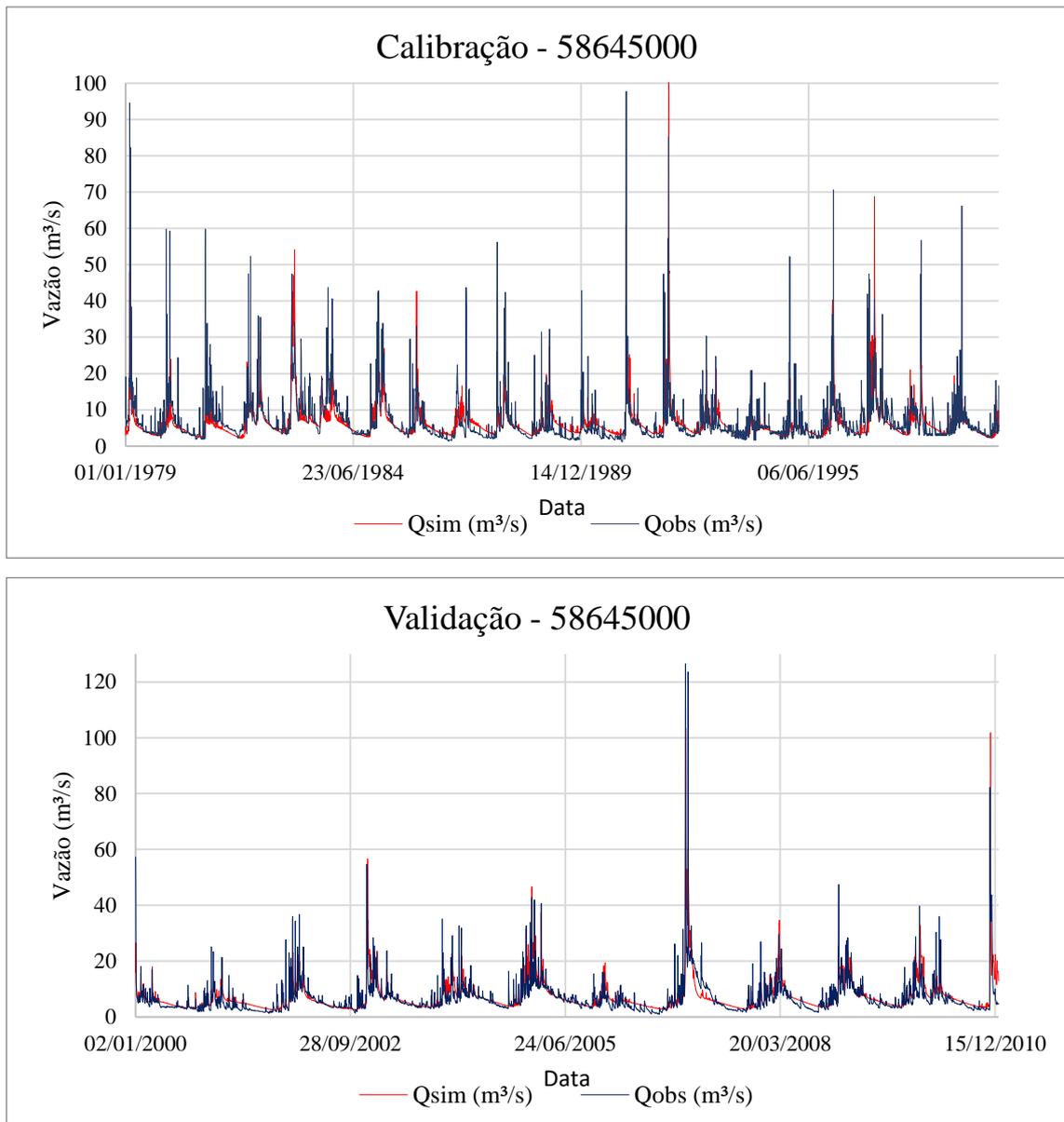
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58585000.*



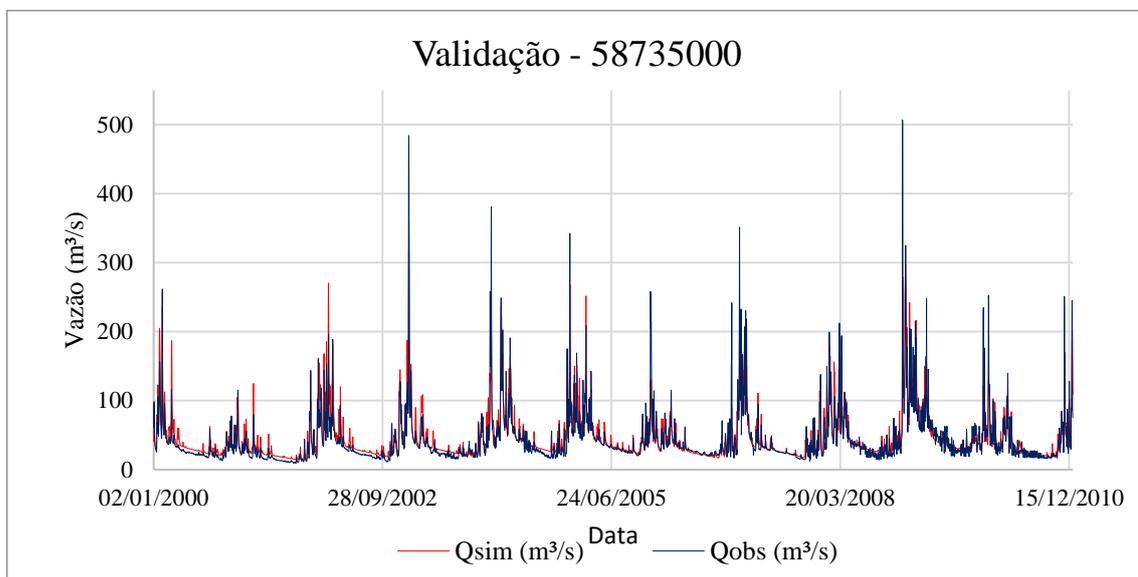
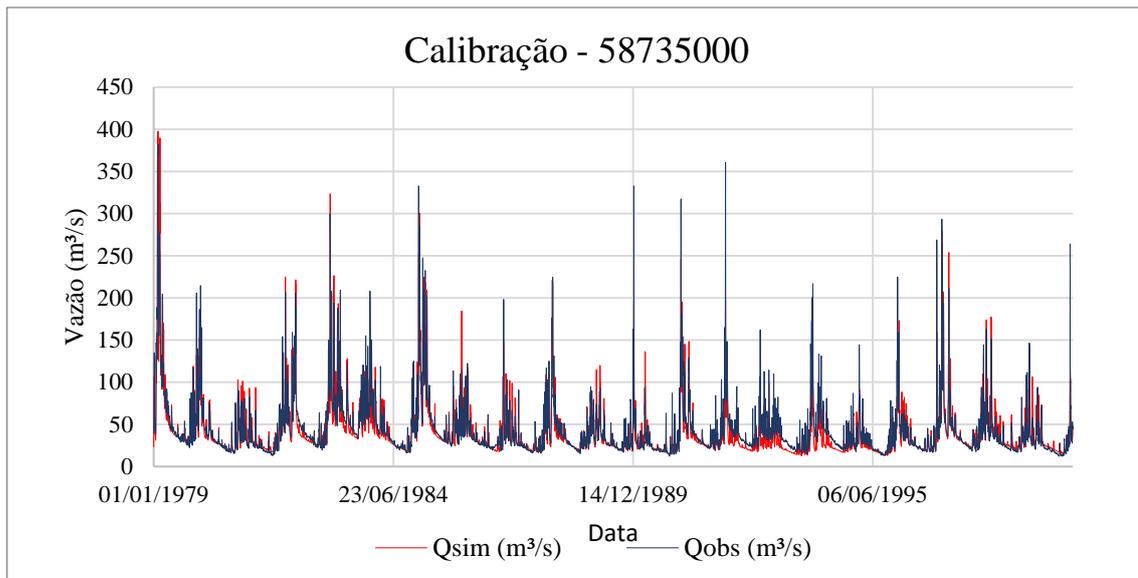
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58610000.*



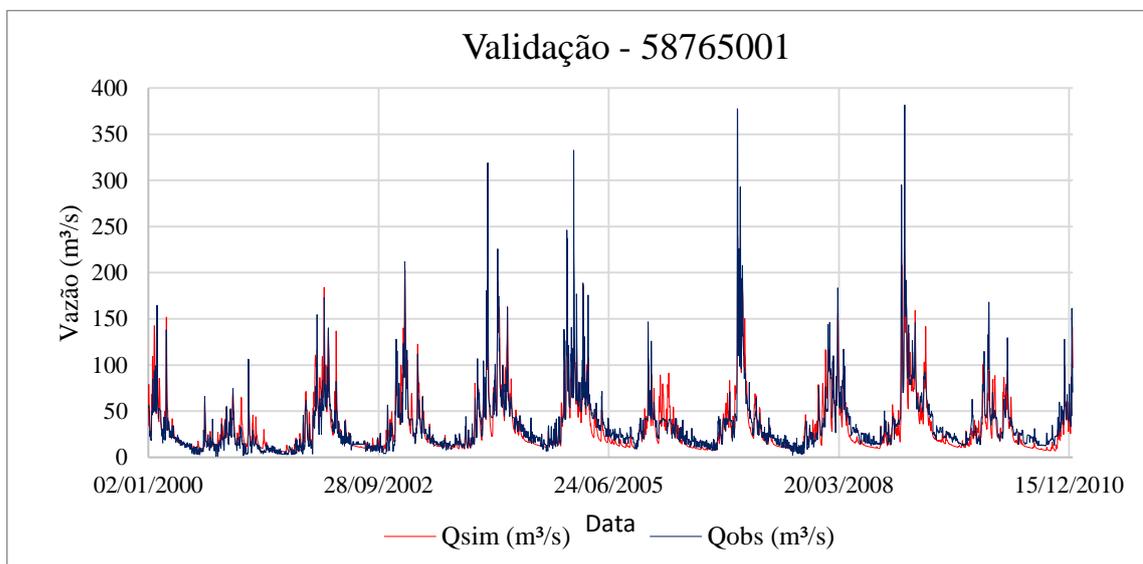
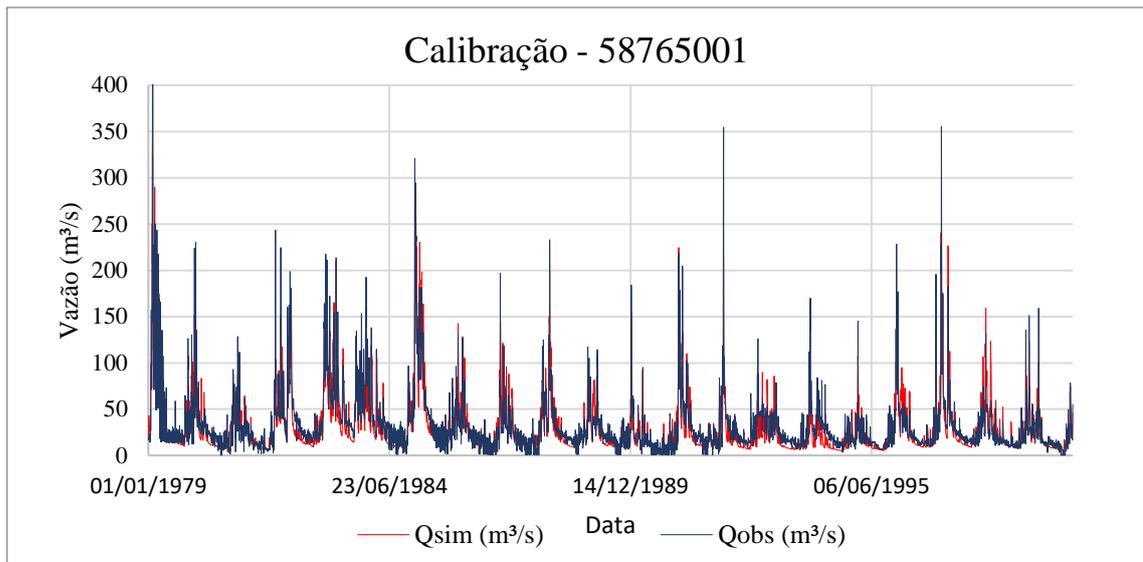
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58630002.*



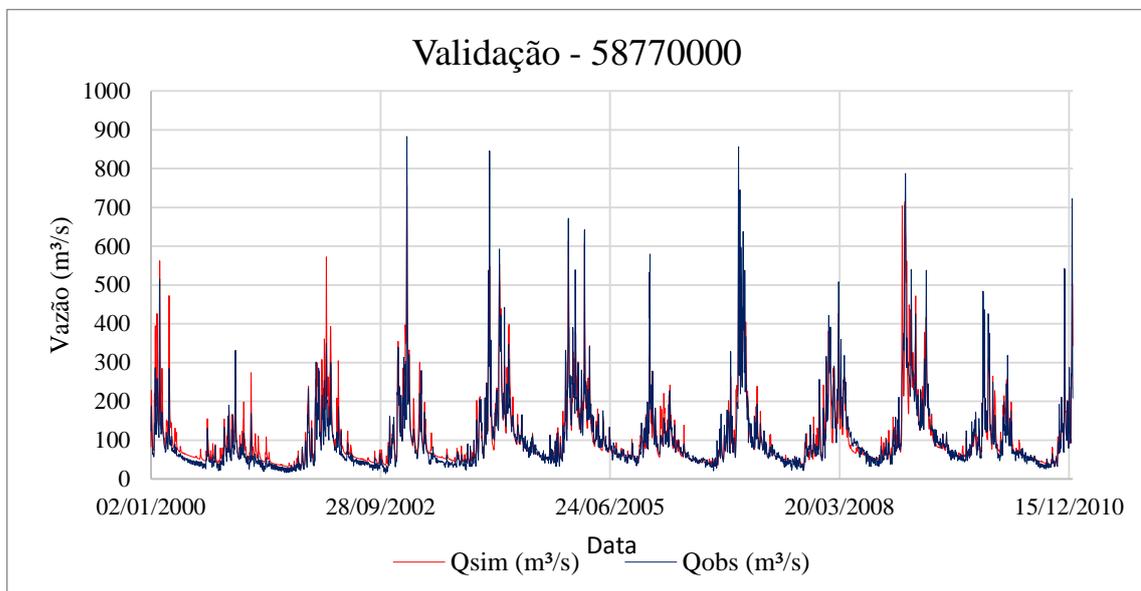
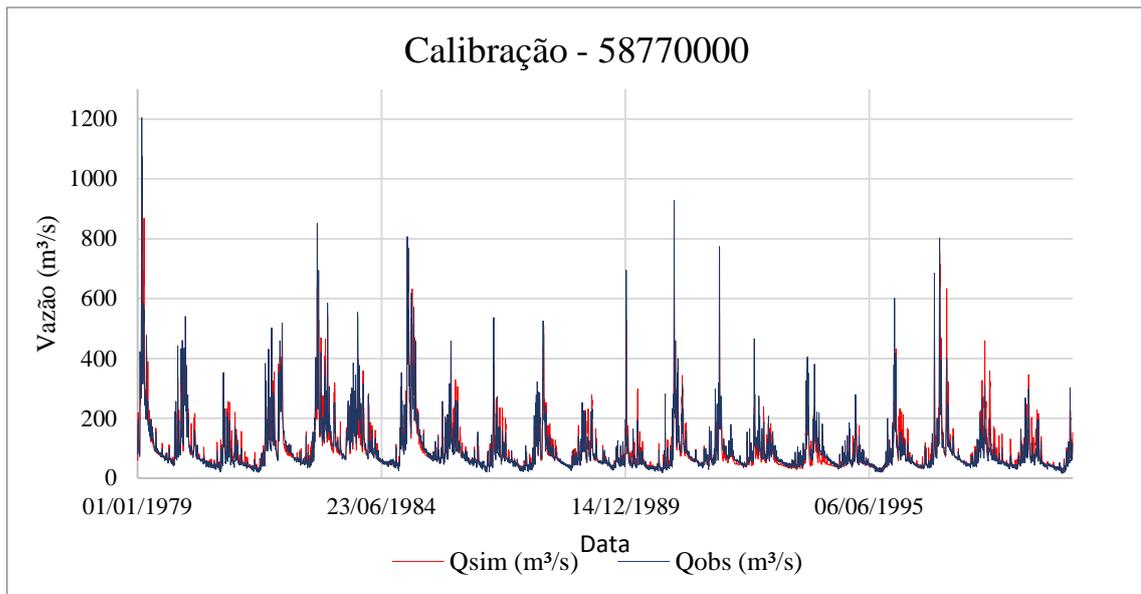
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58645000.*



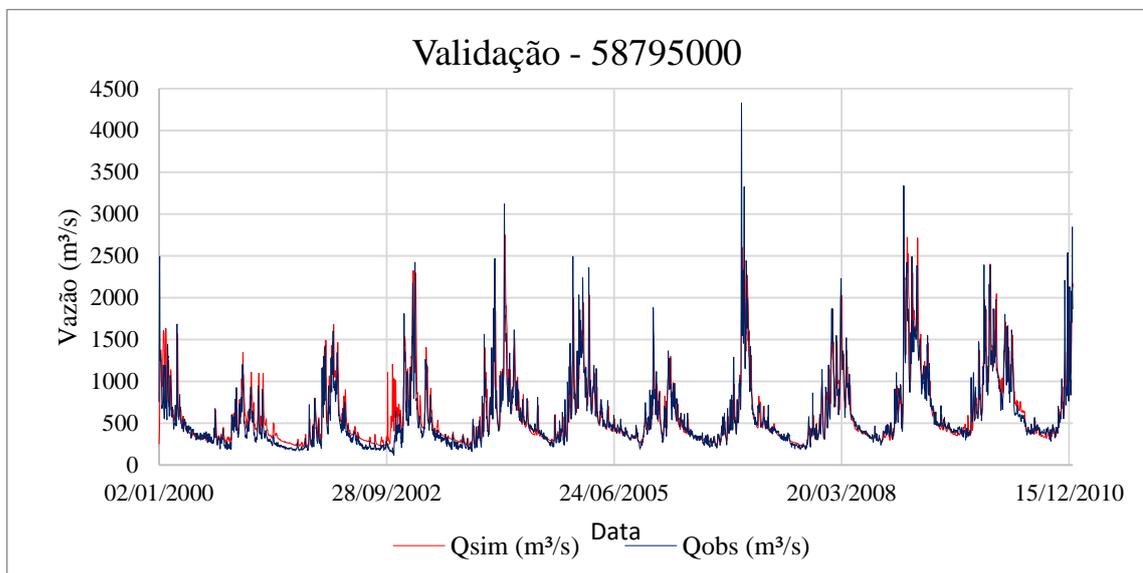
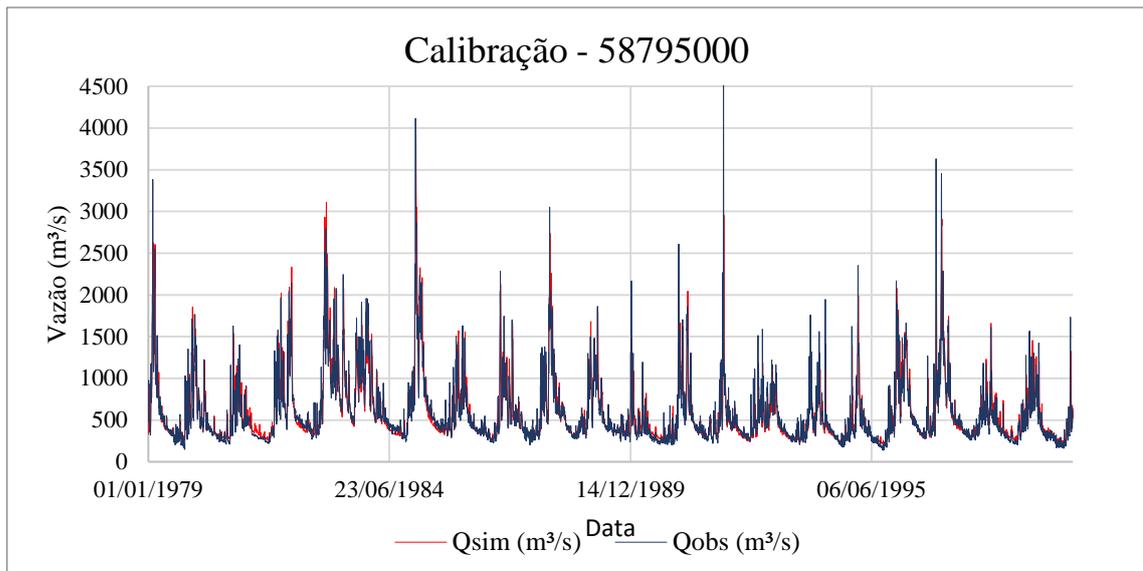
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58735000.*



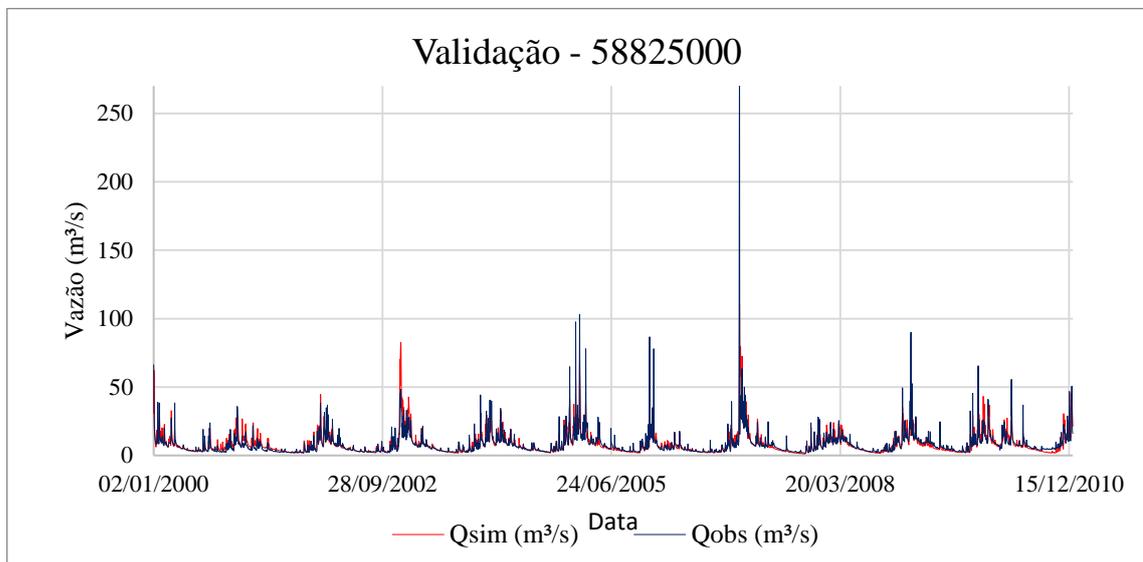
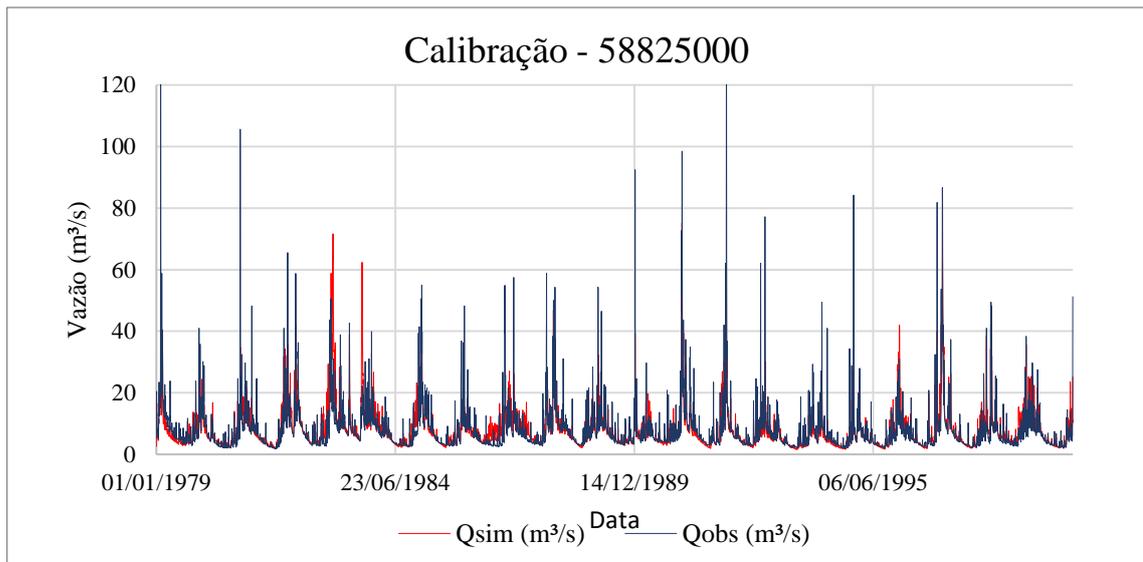
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 5876001.*



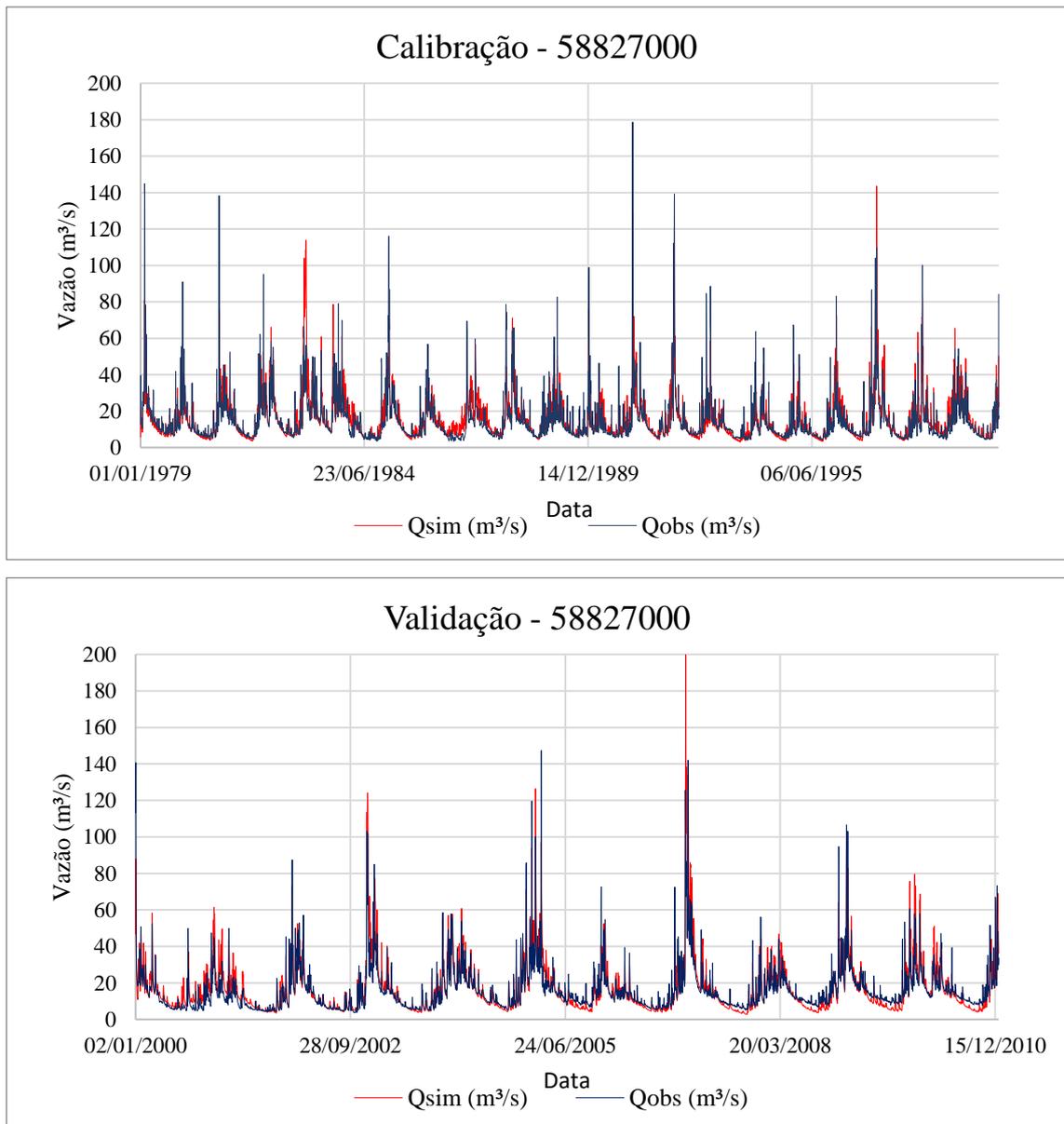
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58770000.*



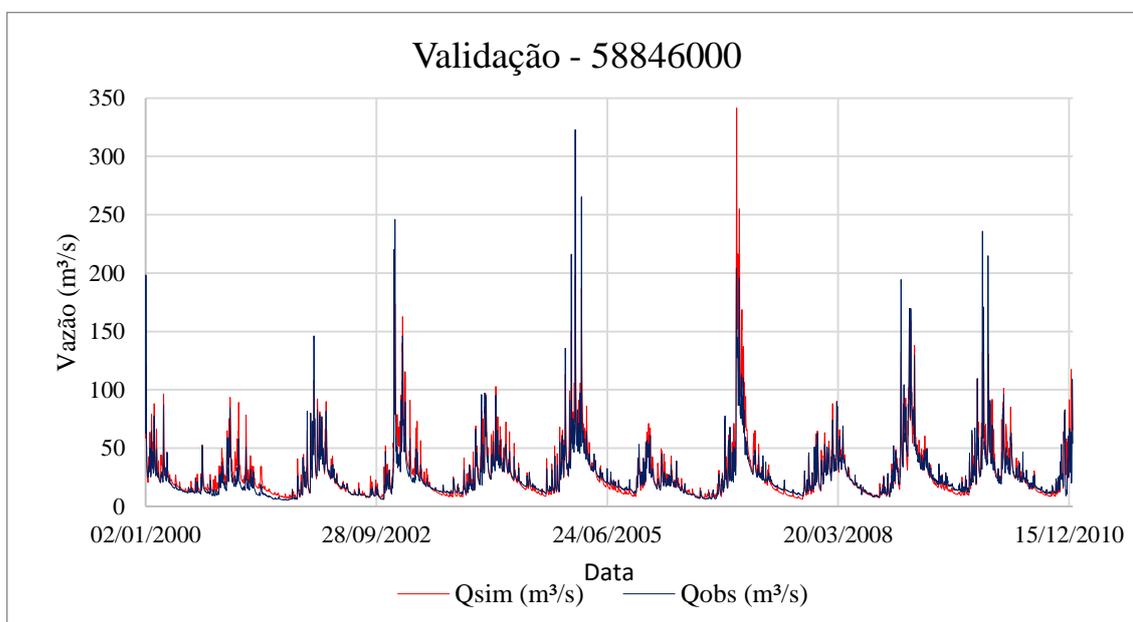
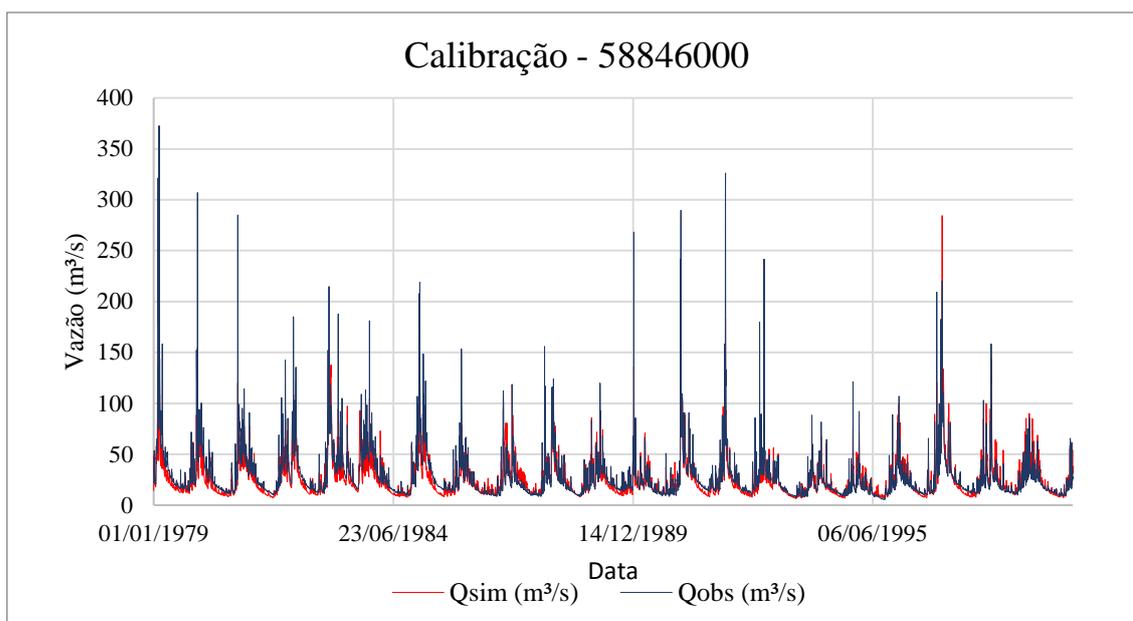
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58795000.*



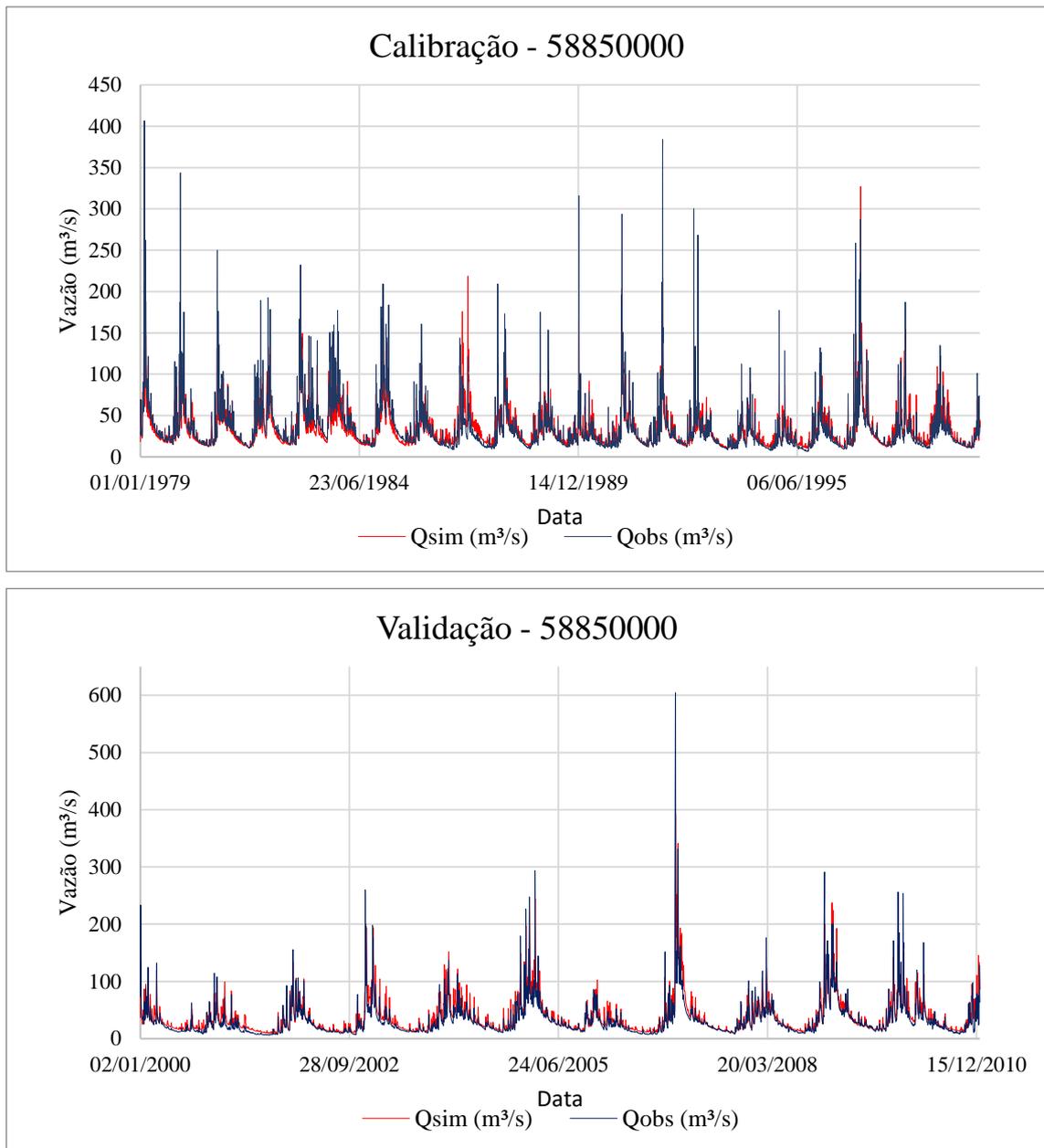
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58825000.*



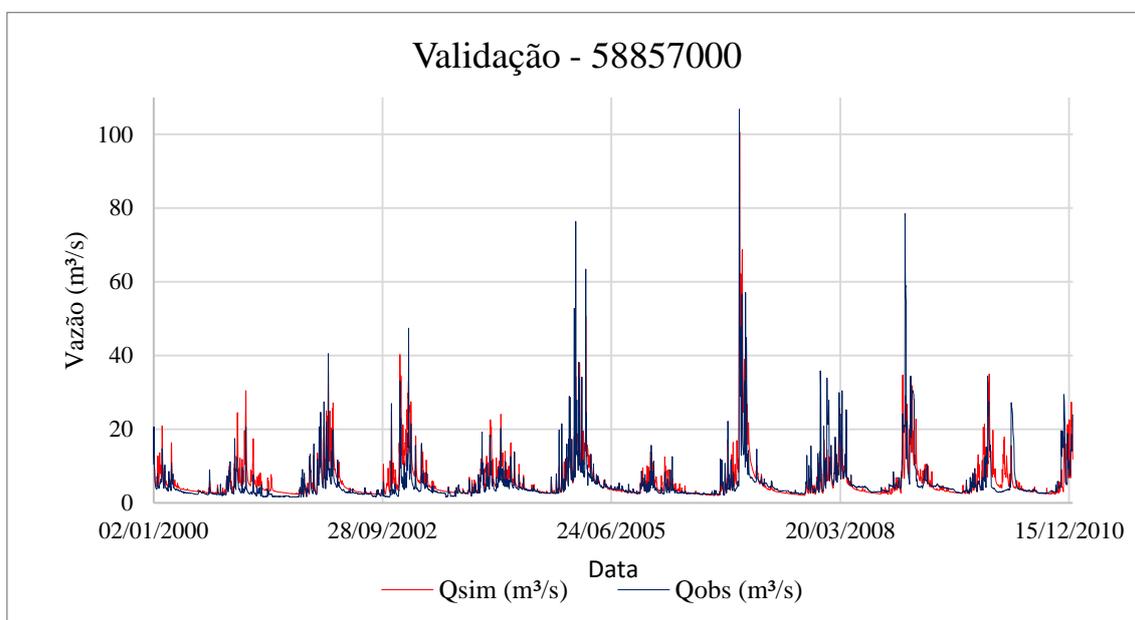
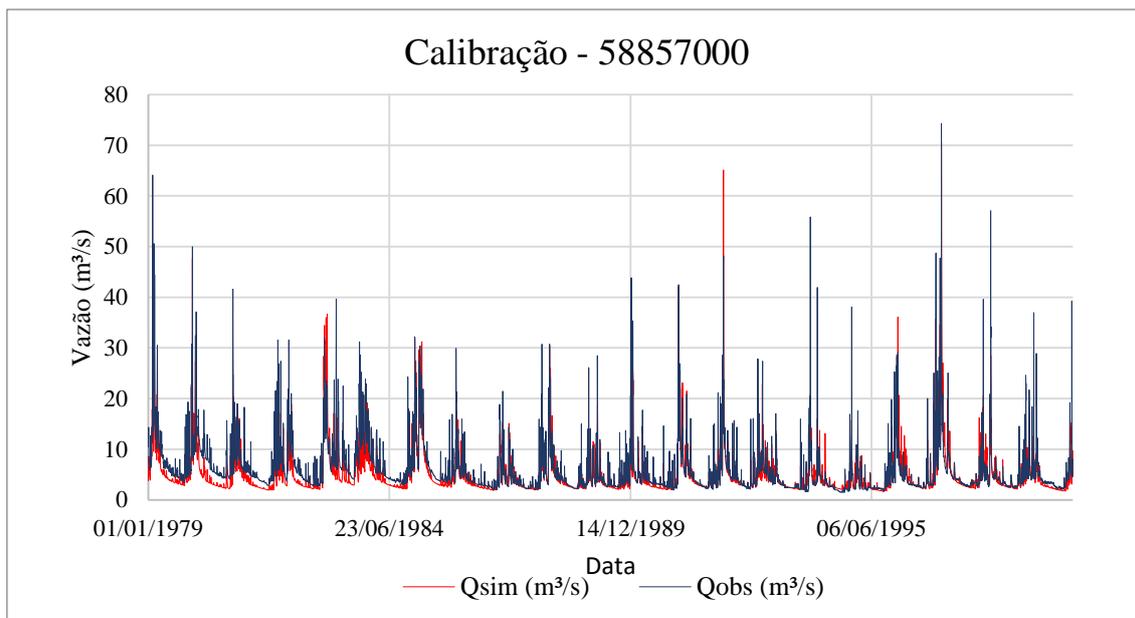
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58827000.*



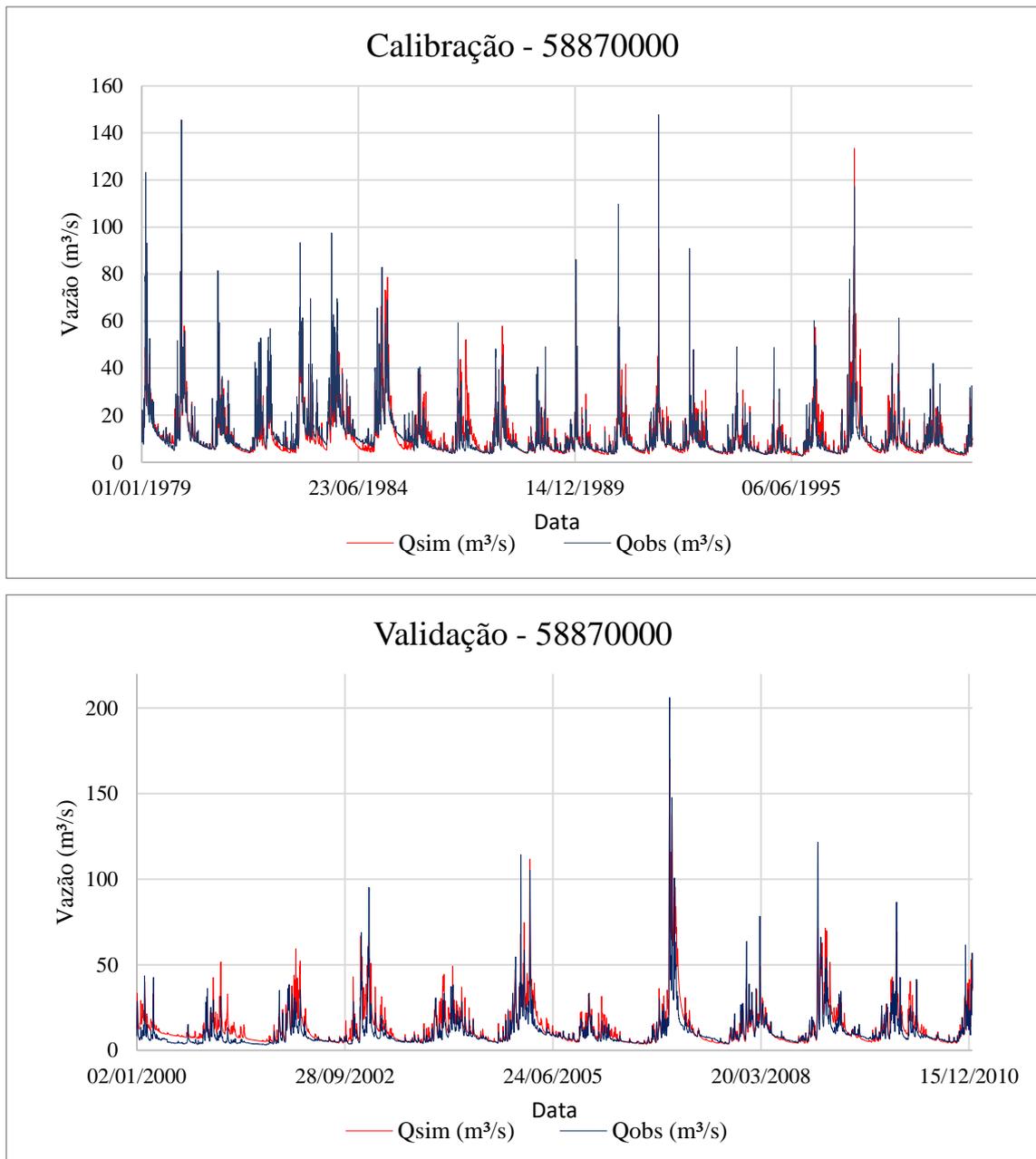
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58846000.*



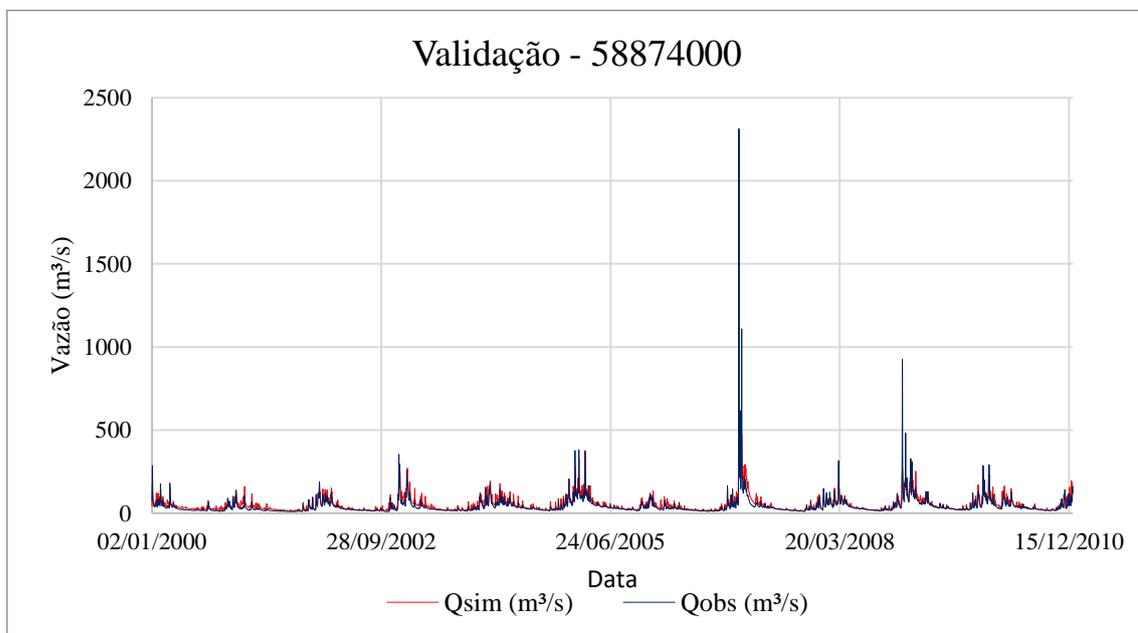
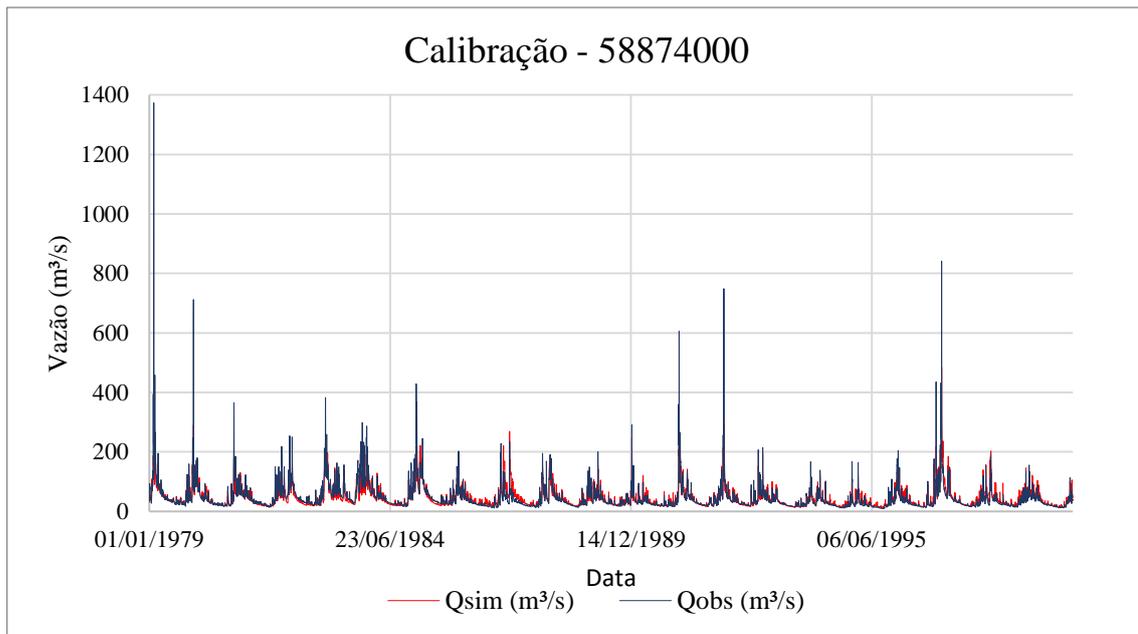
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58850000.*



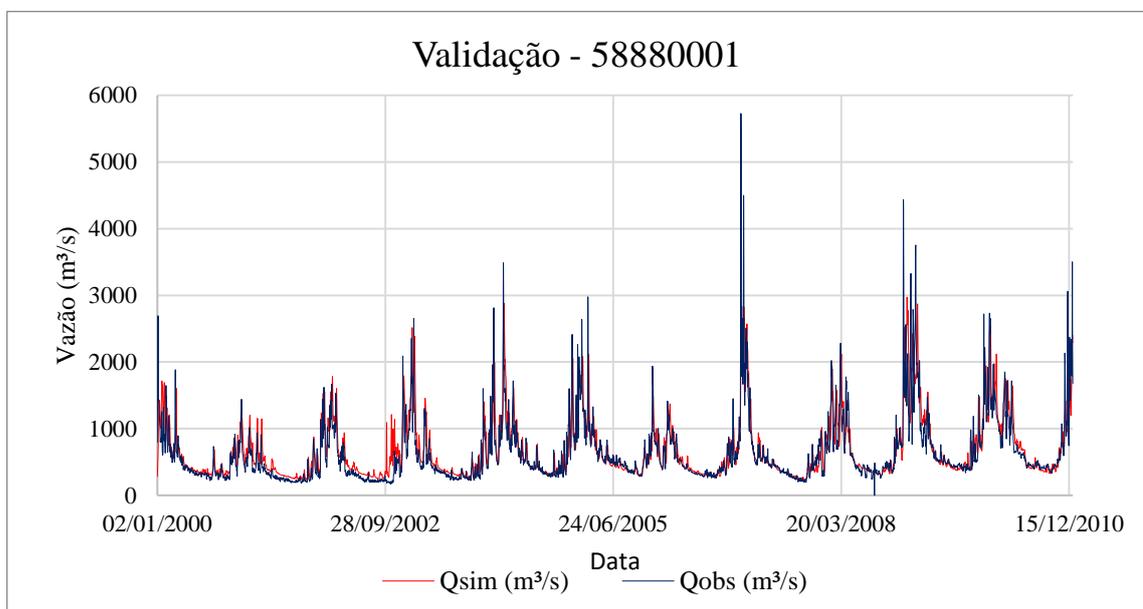
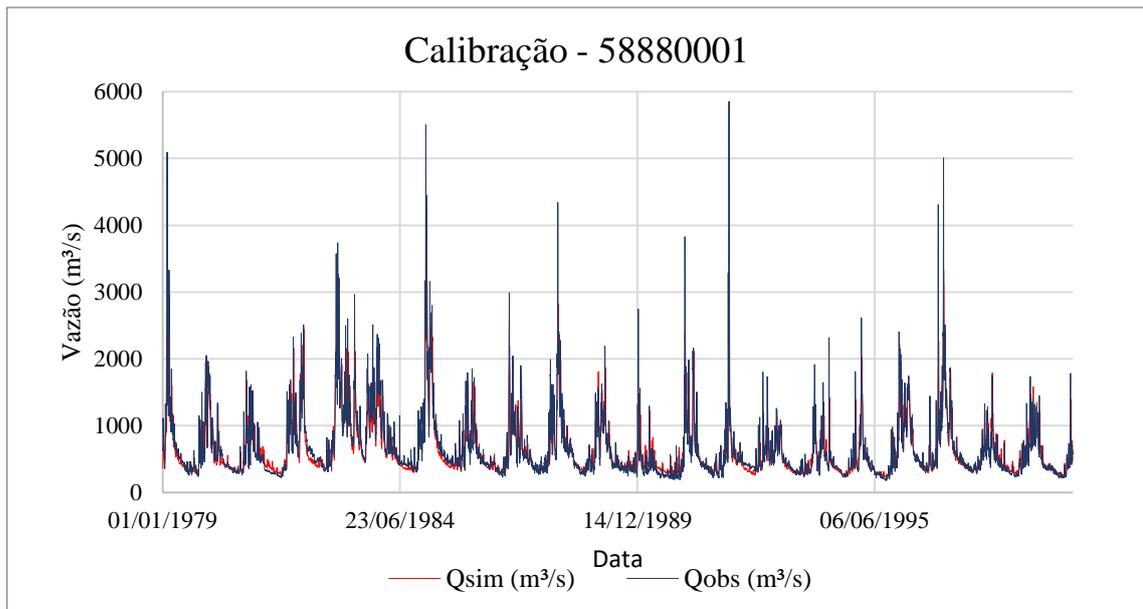
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58857000.*



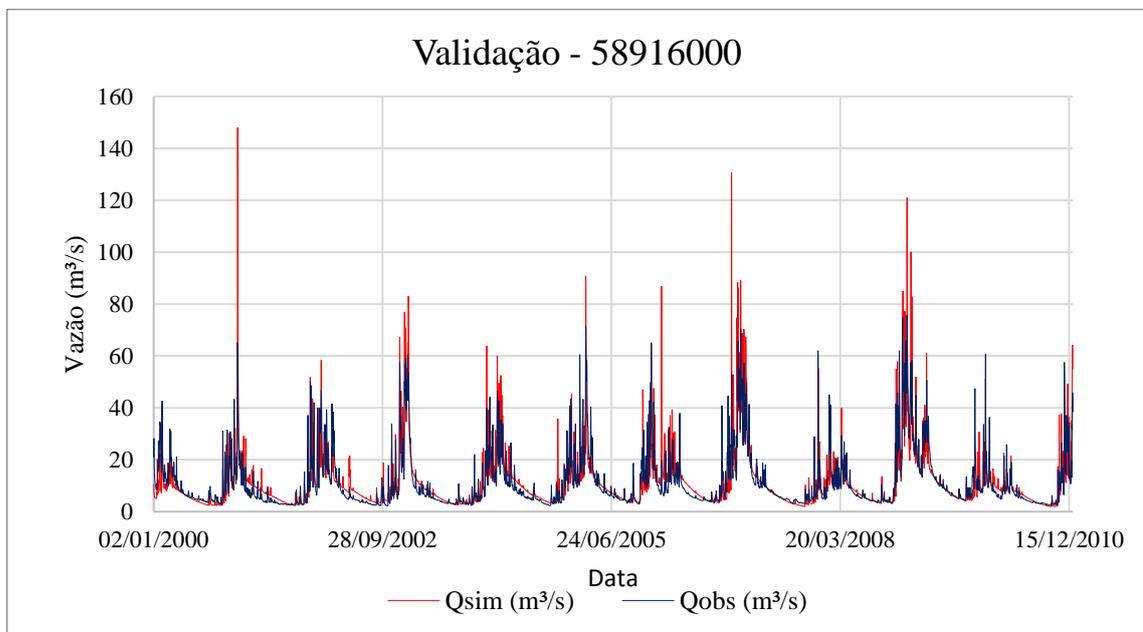
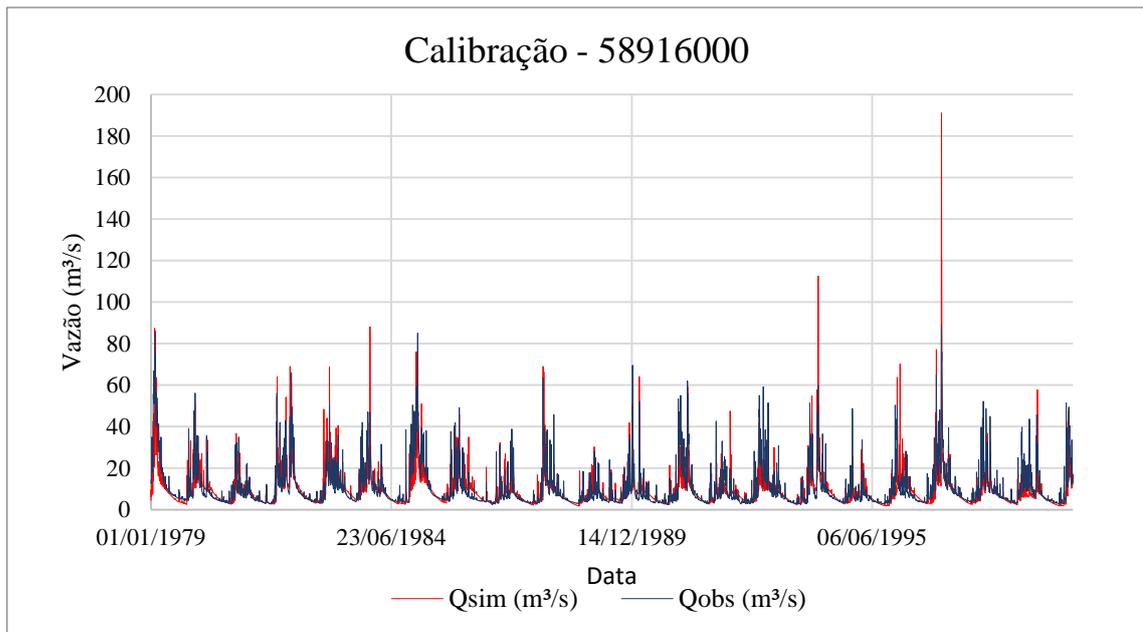
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58870000.*



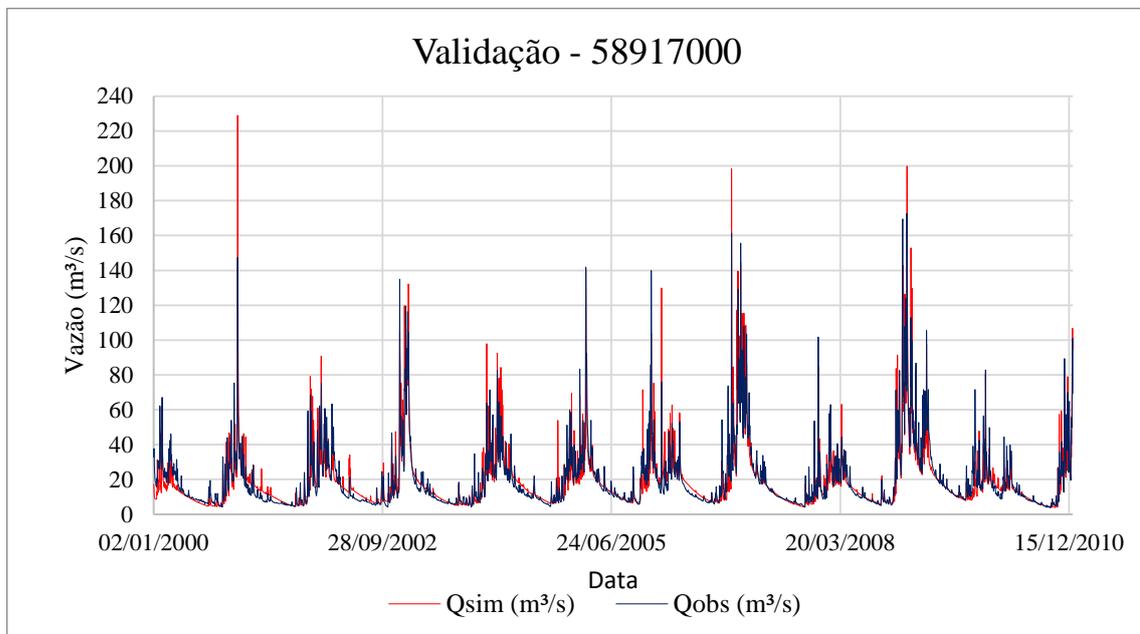
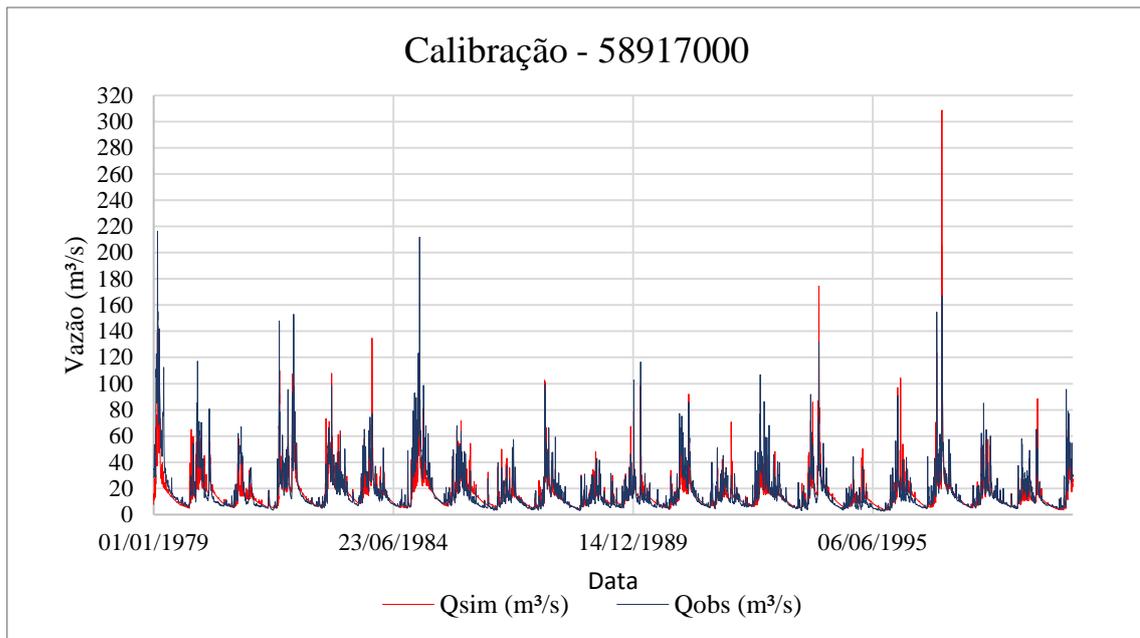
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58874000.*



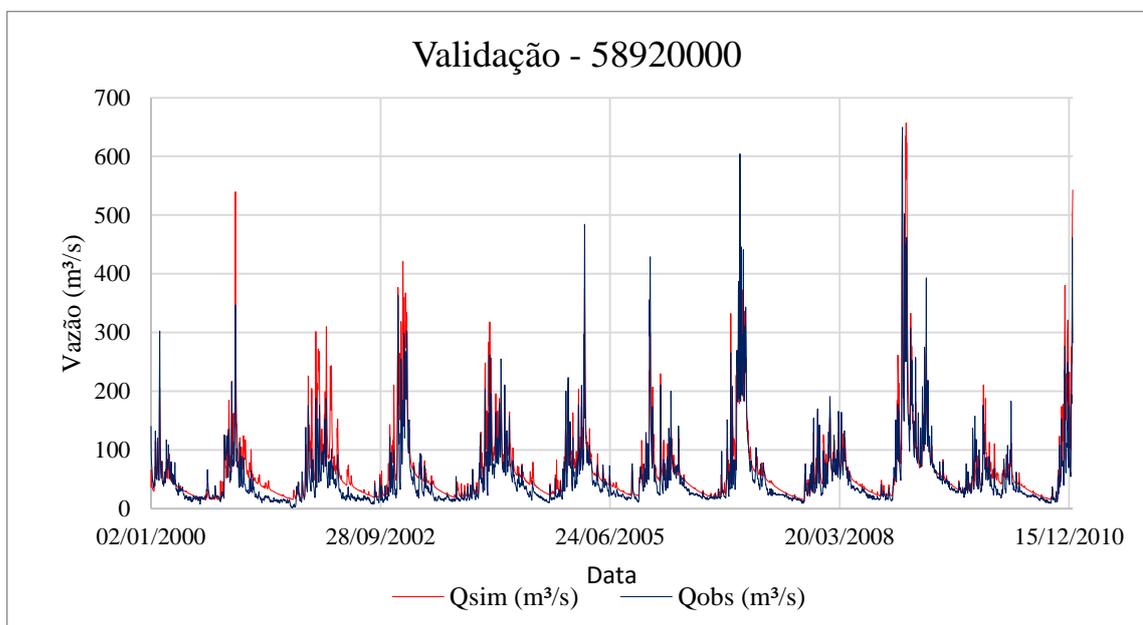
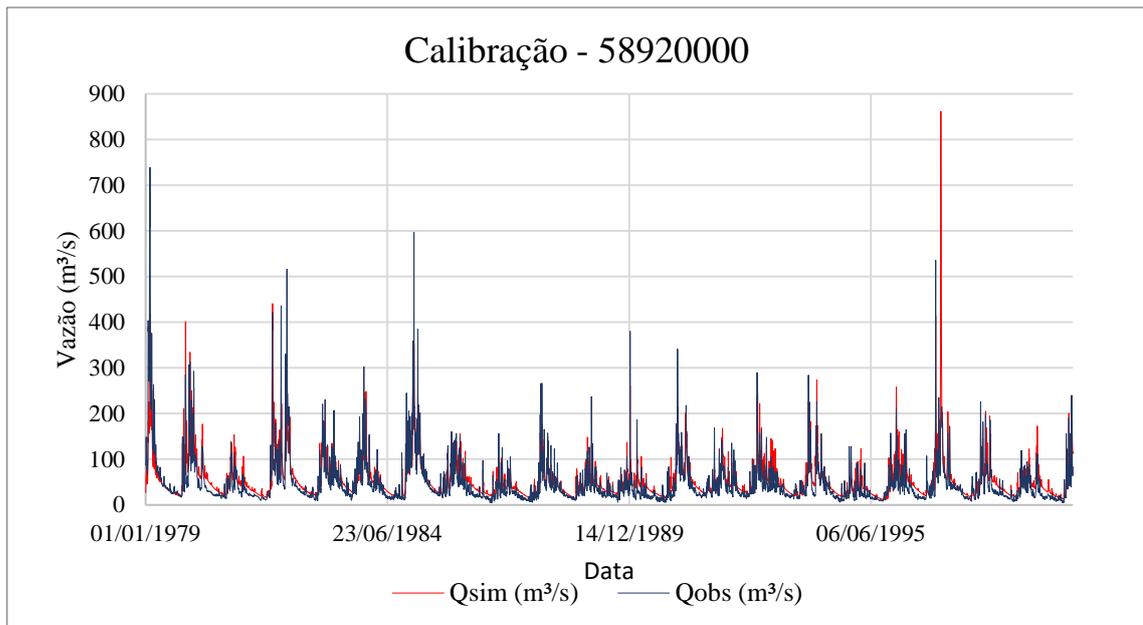
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58880001.*



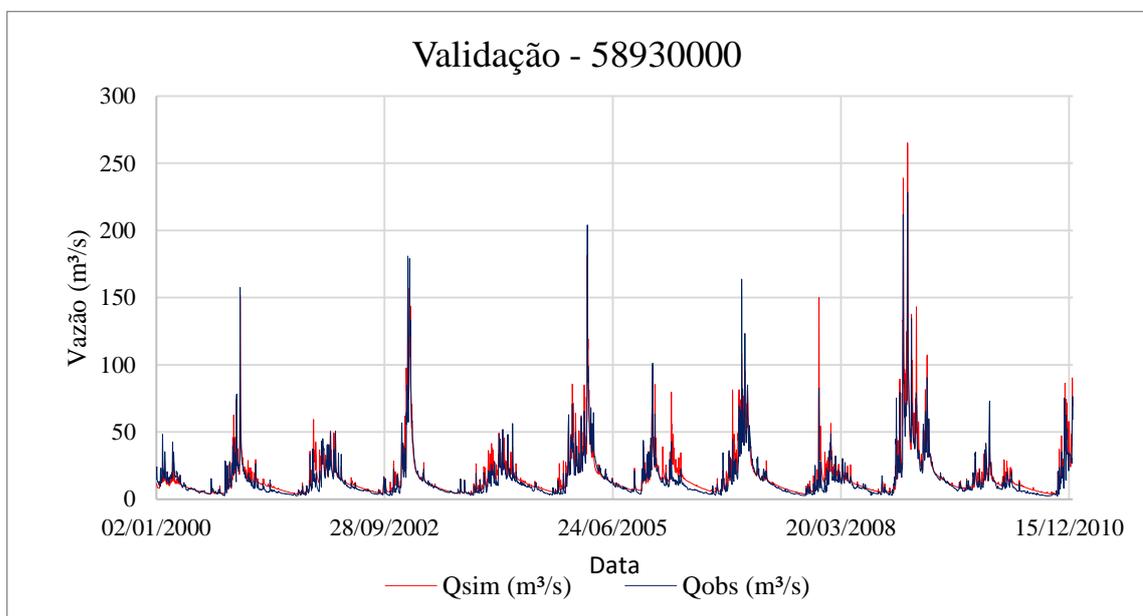
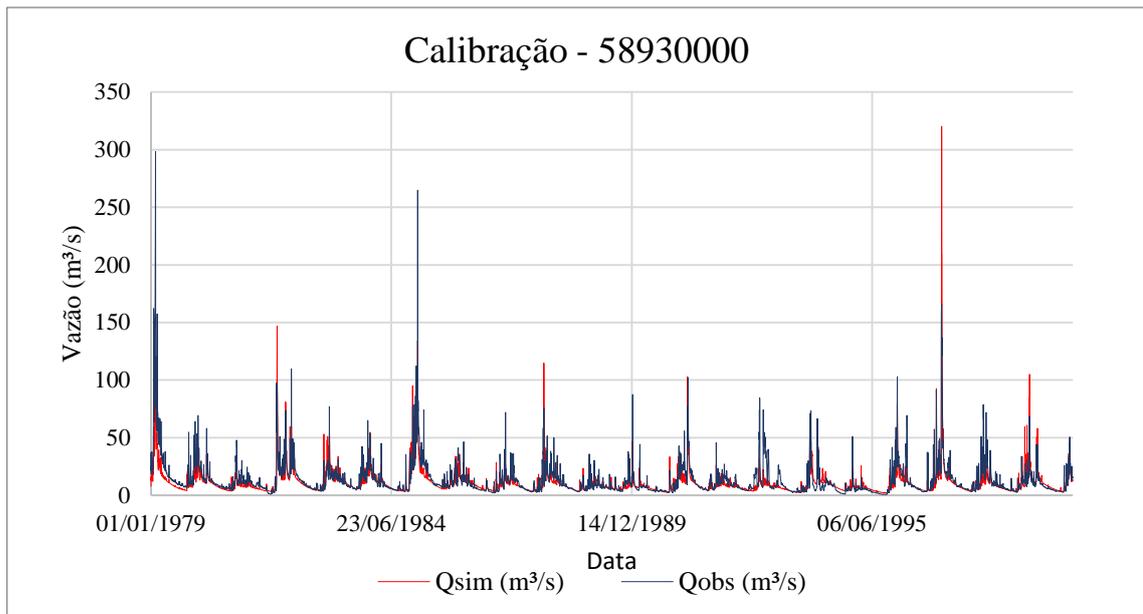
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58916000.*



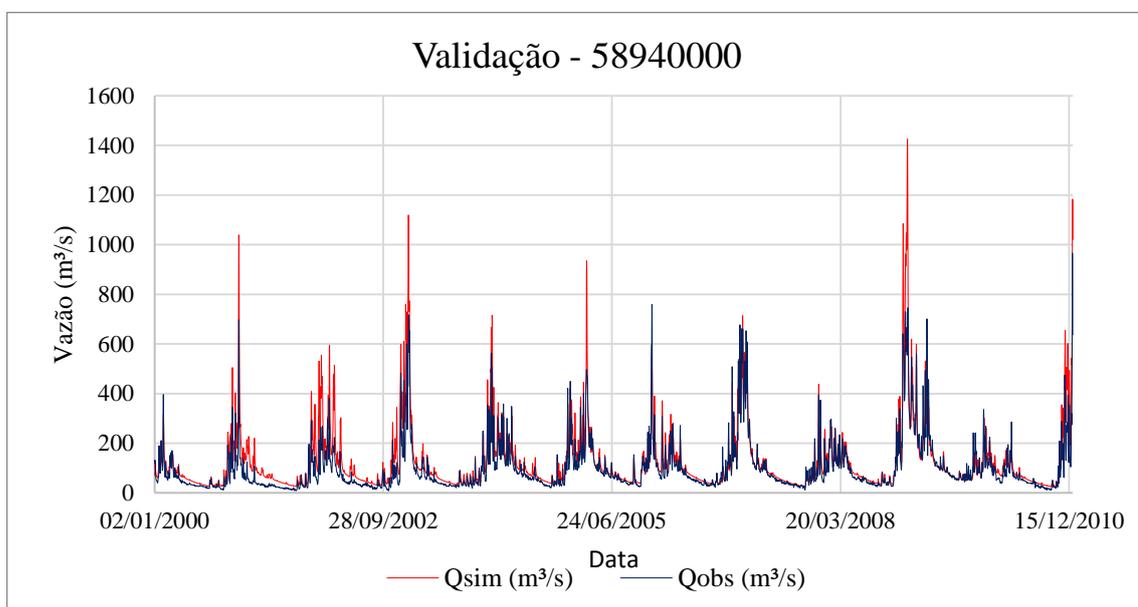
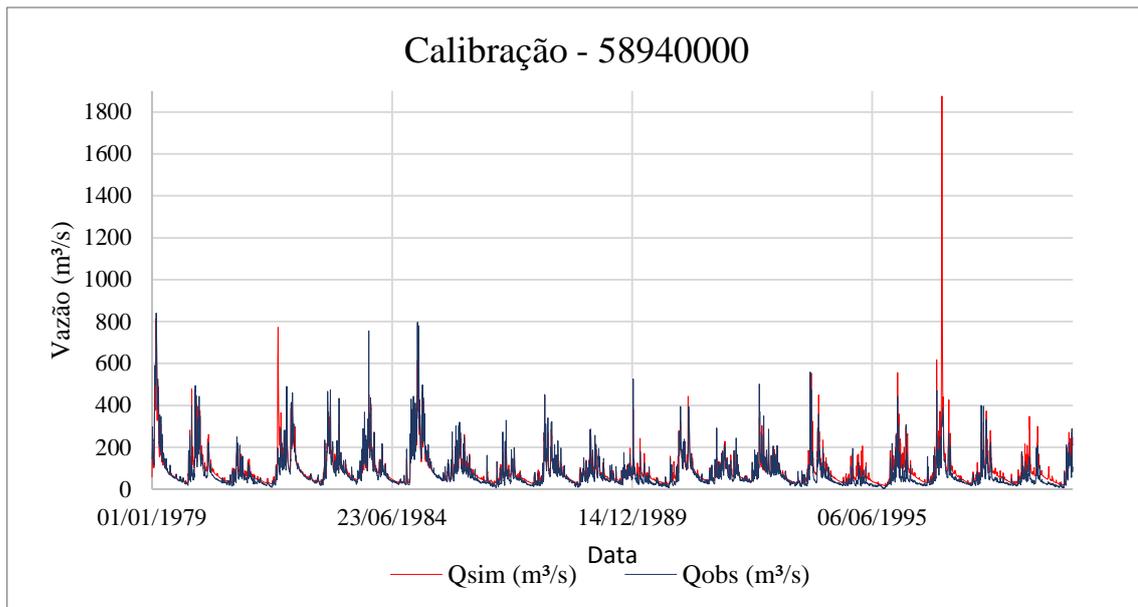
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58917000.*



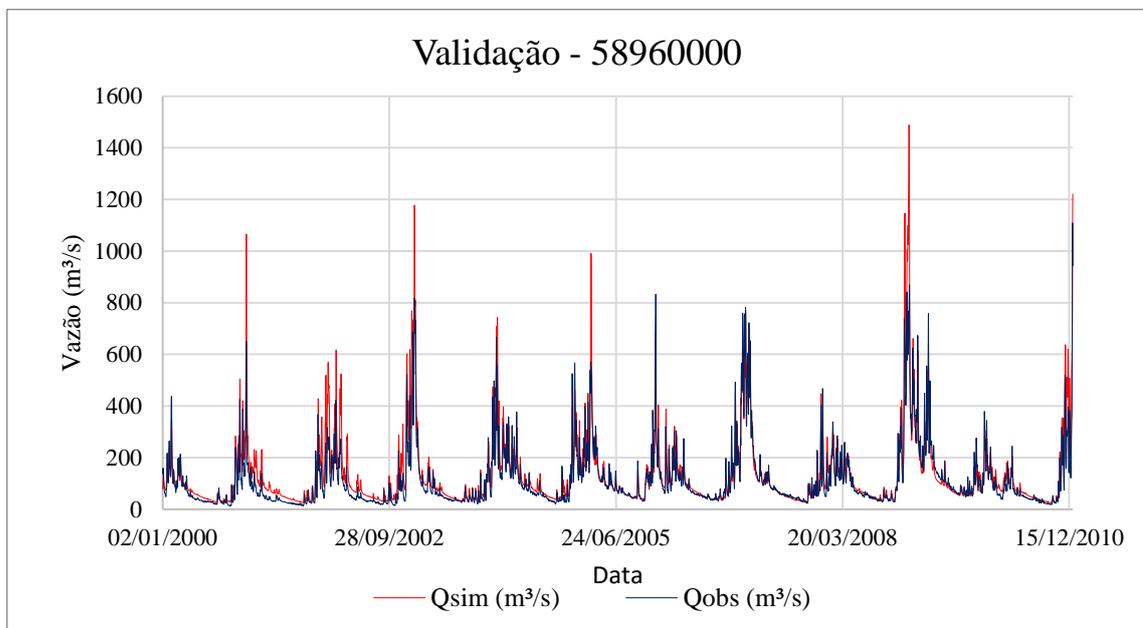
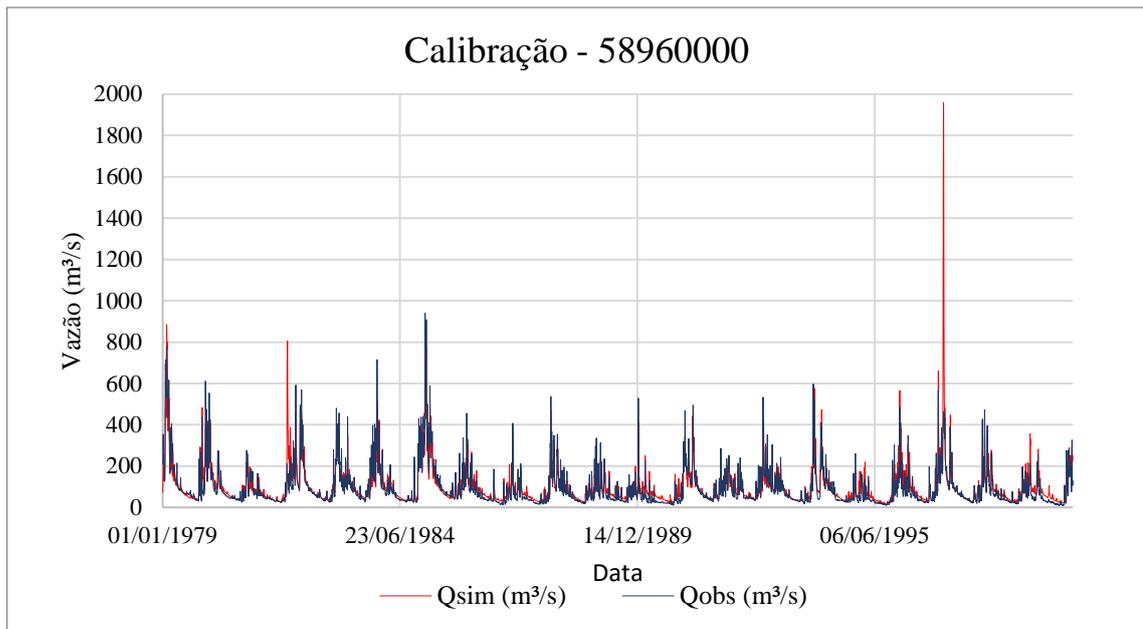
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58920000.*



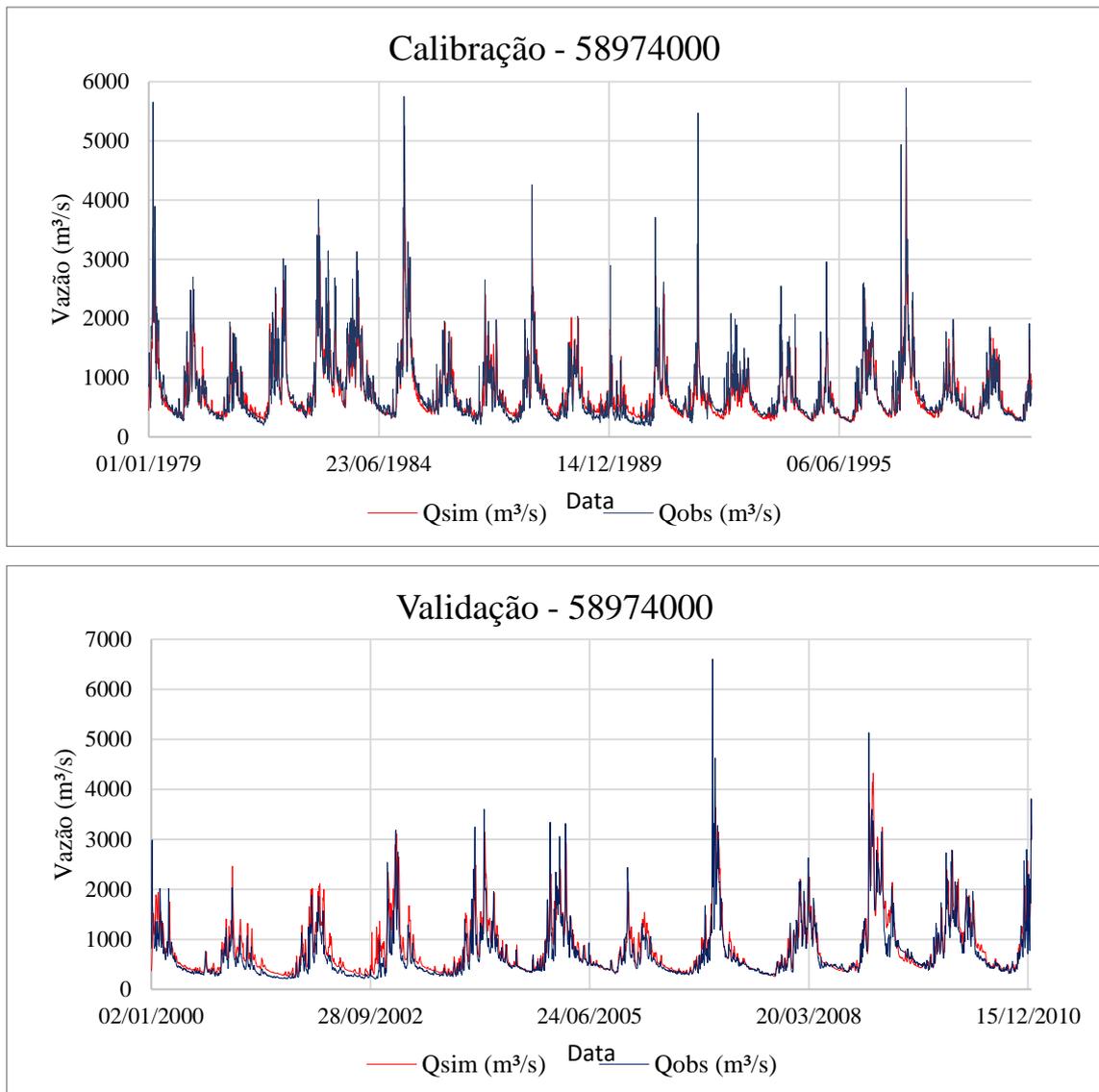
*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58930000.*



*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58940000.*

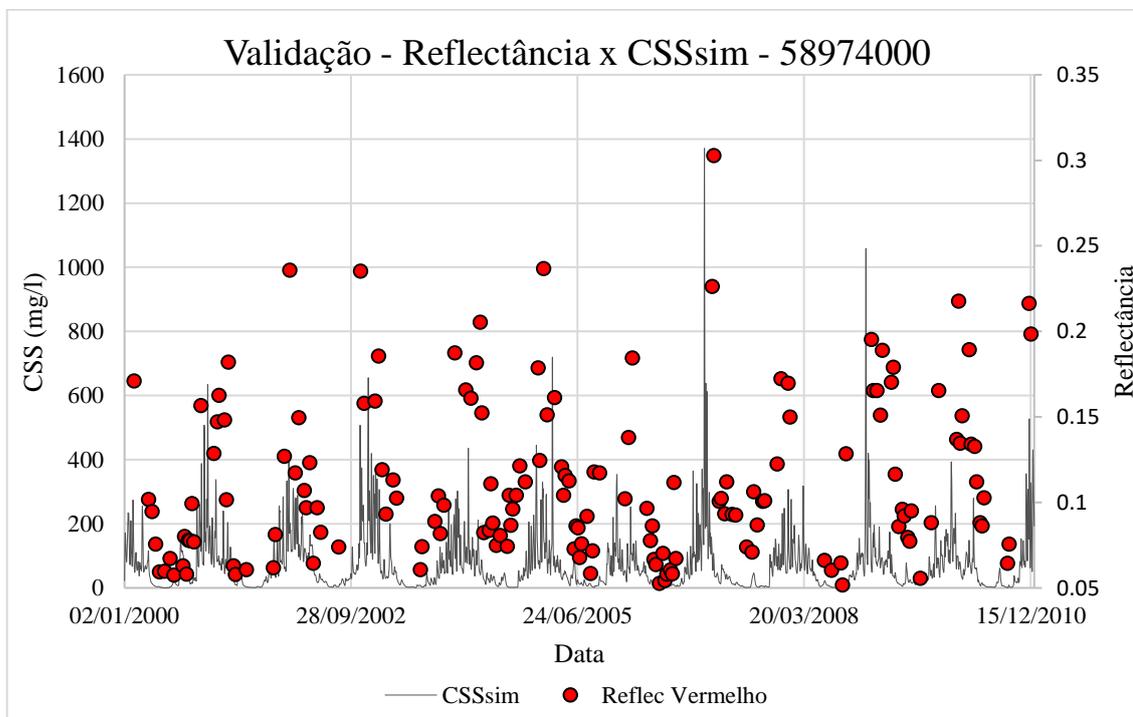
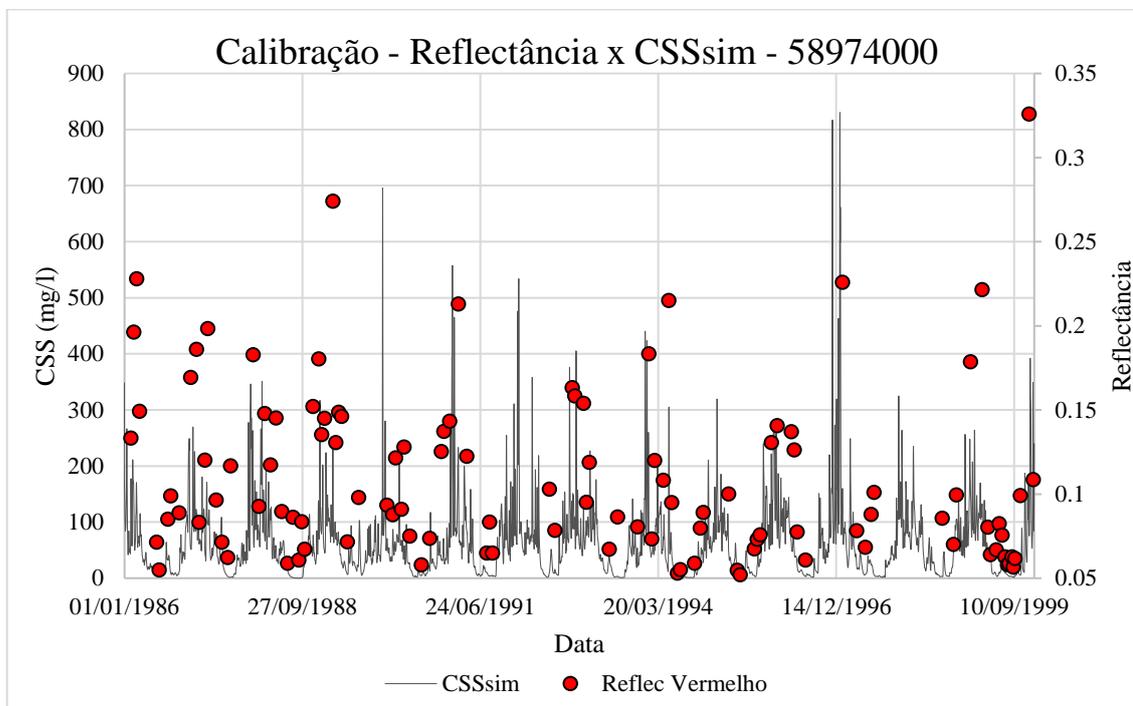


*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58960000.*

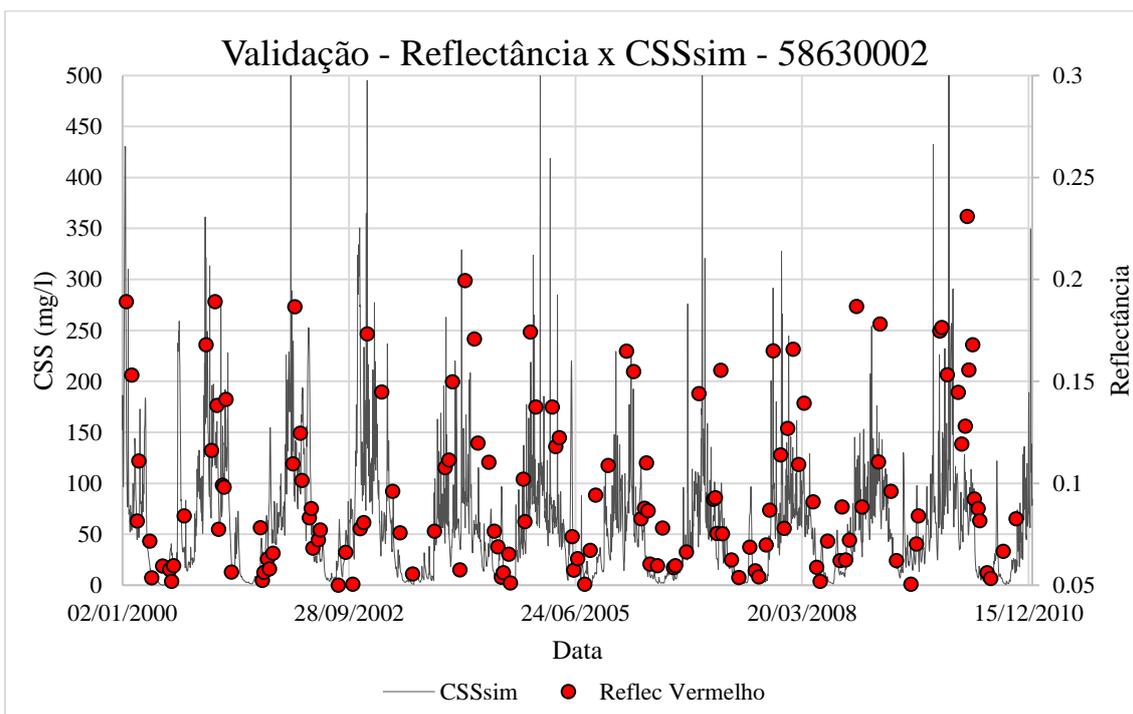
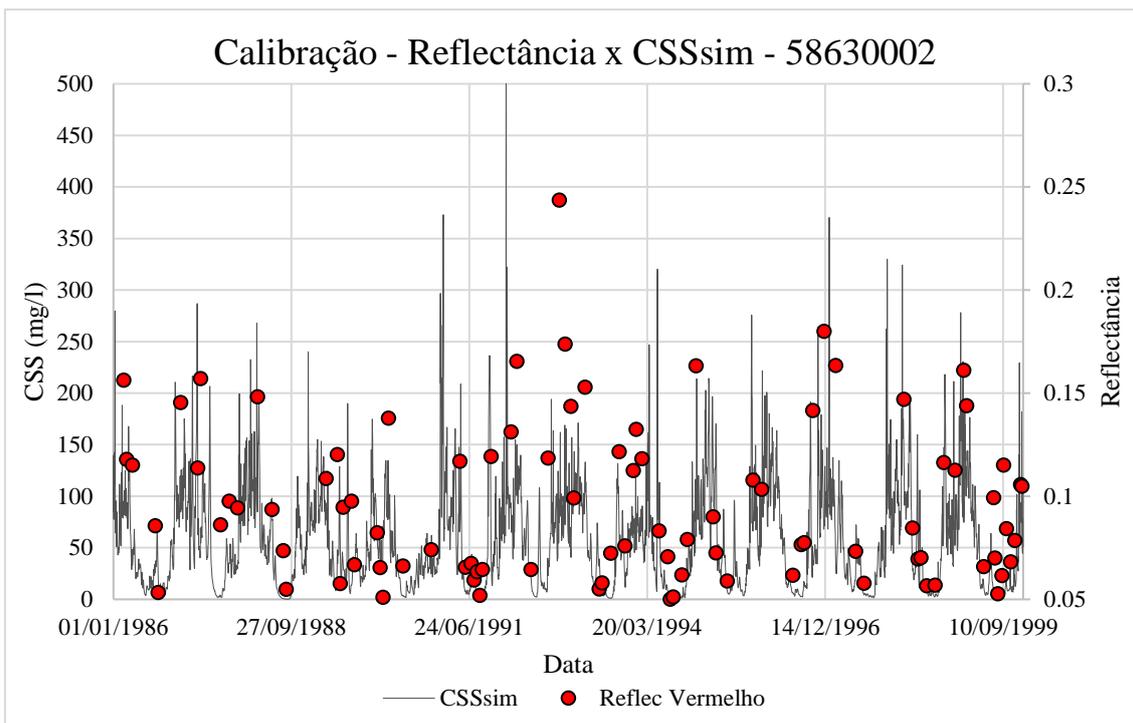


*Hidrogramas de vazões simuladas e observadas para o posto 58974000.*

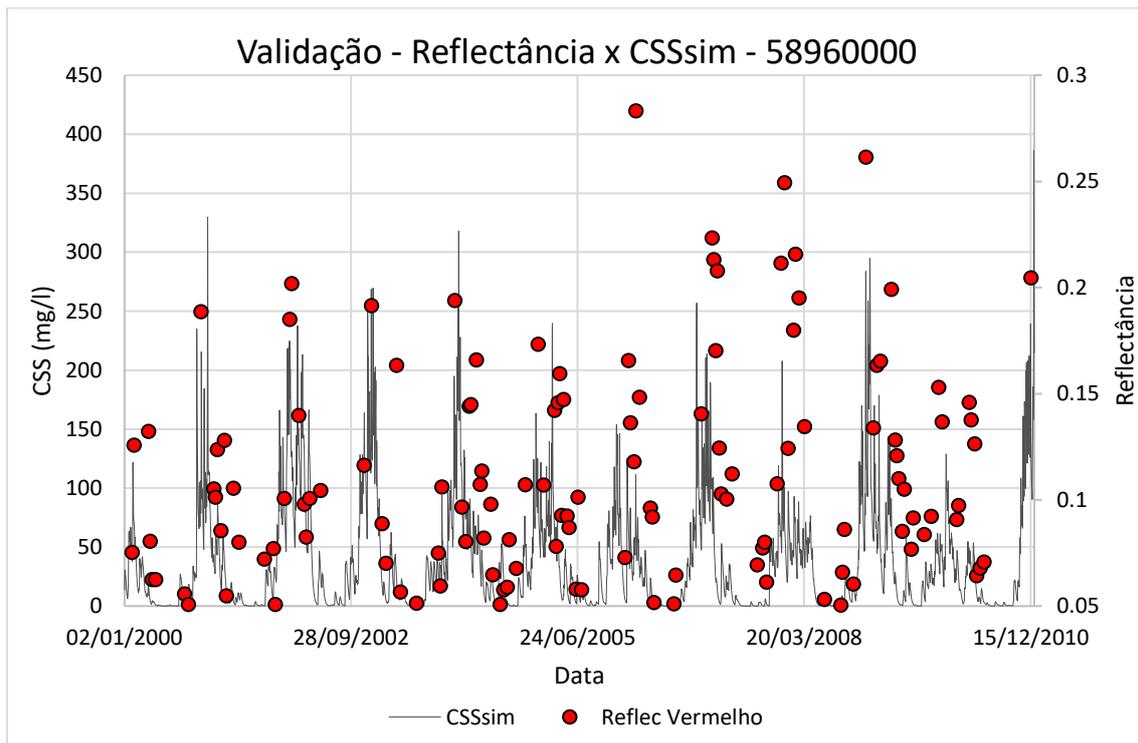
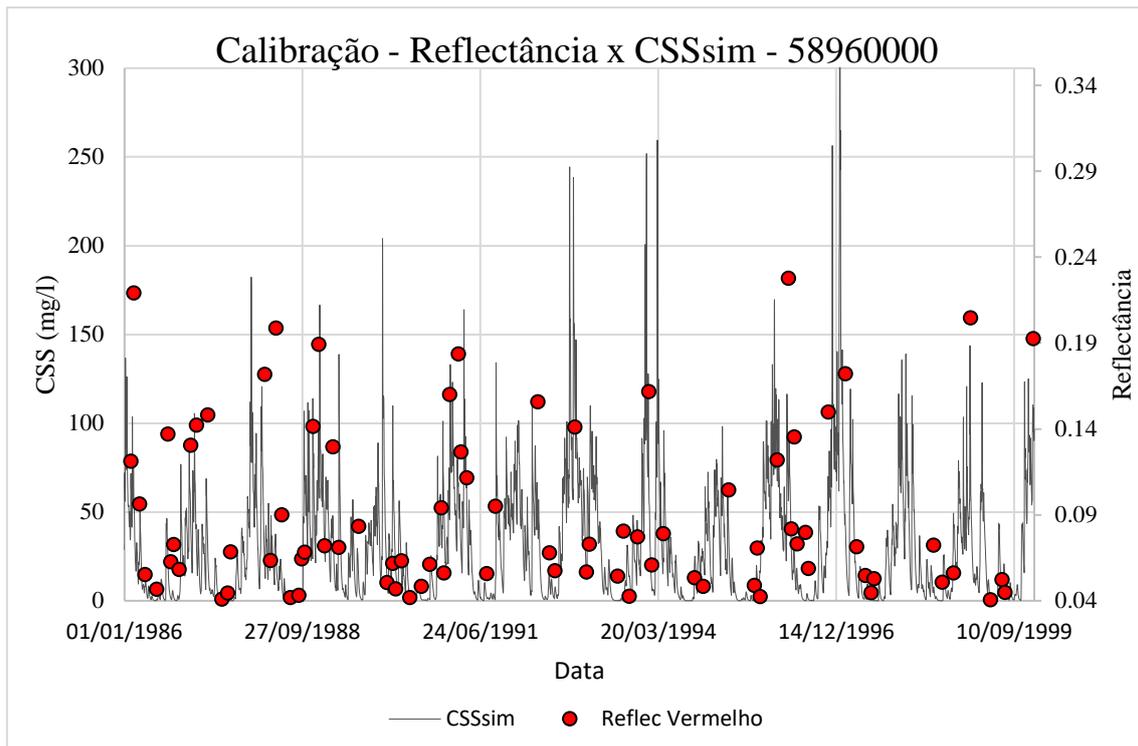
#### Apêndice IV - Comparativos Entre a CSS Simulada e a Reflectância Espectral da Superfície da Banda do Vermelho



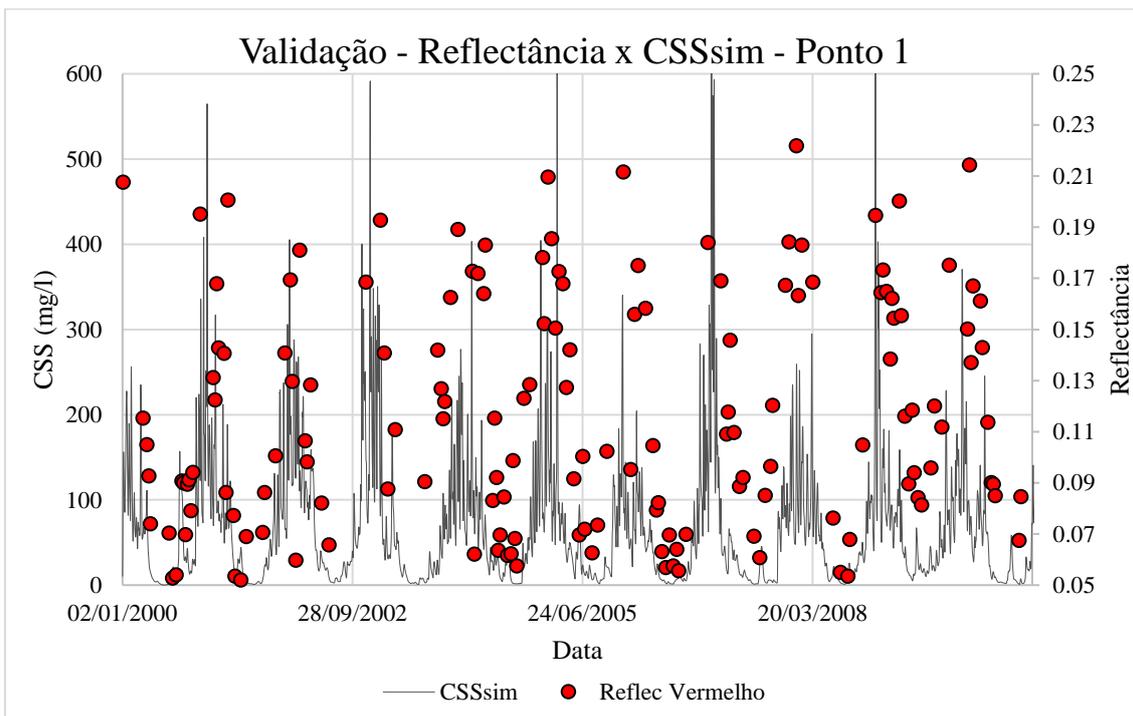
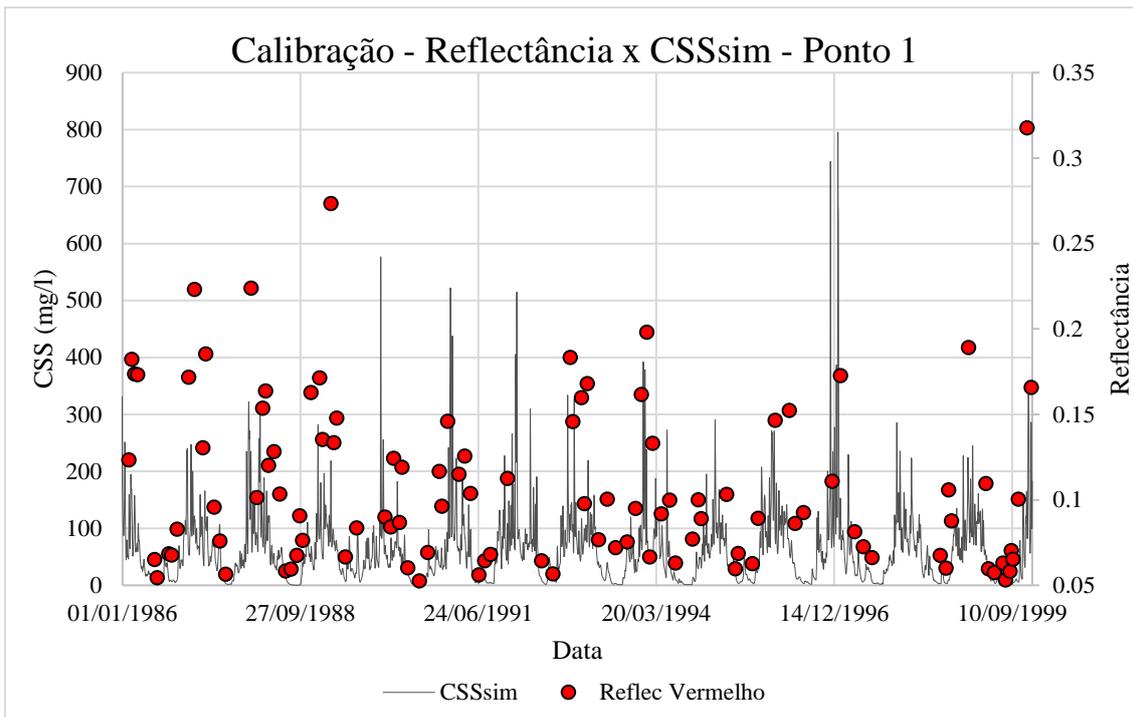
*Comparativo entre a CSS simulada e a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho no ponto 58974000.*



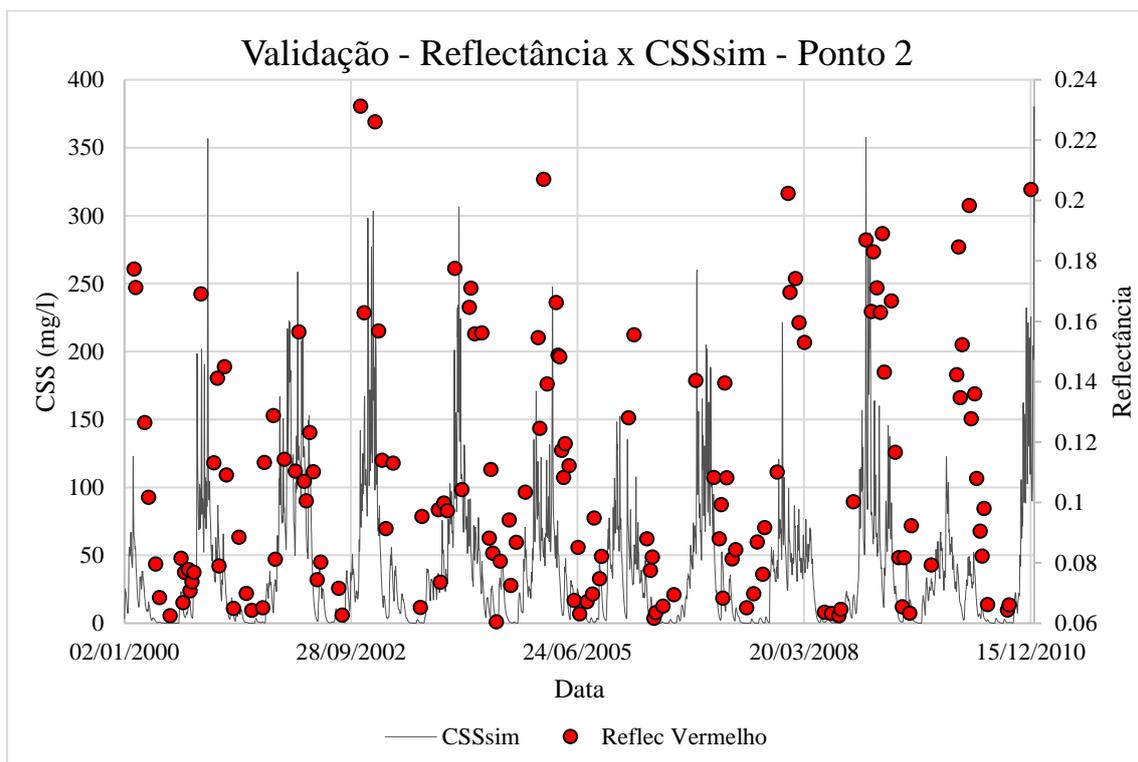
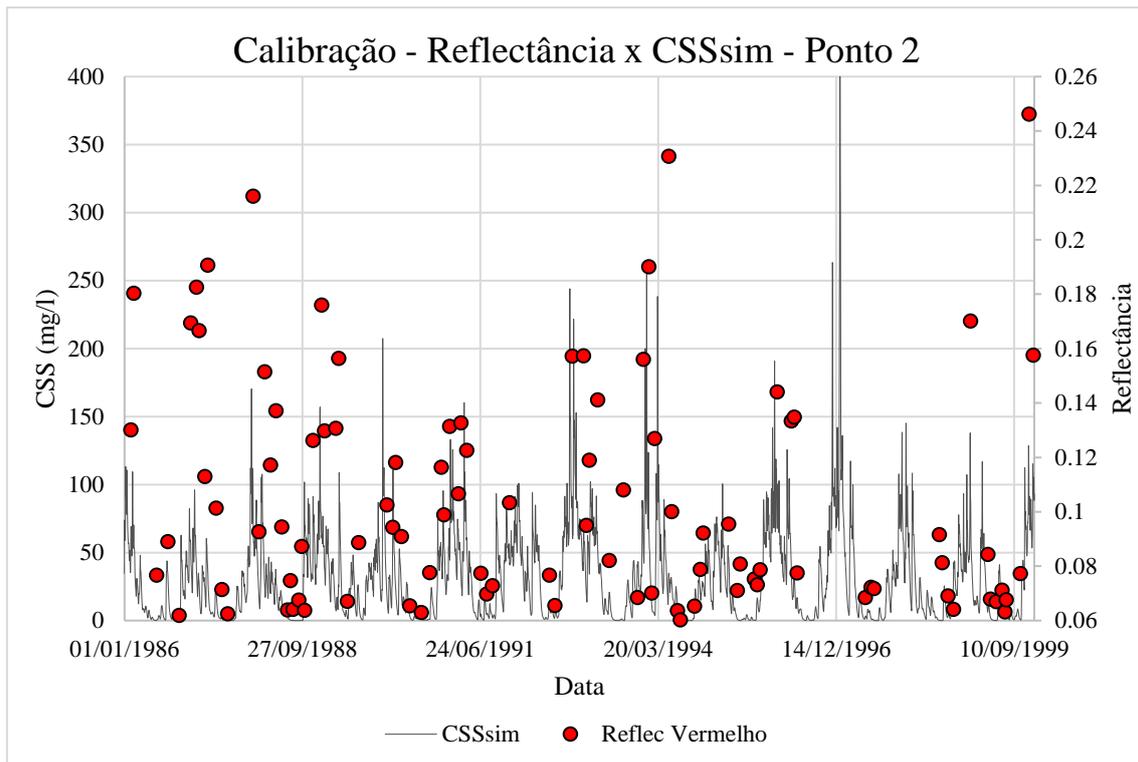
*Comparativo entre a CSS simulada e a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho no ponto 58630002.*



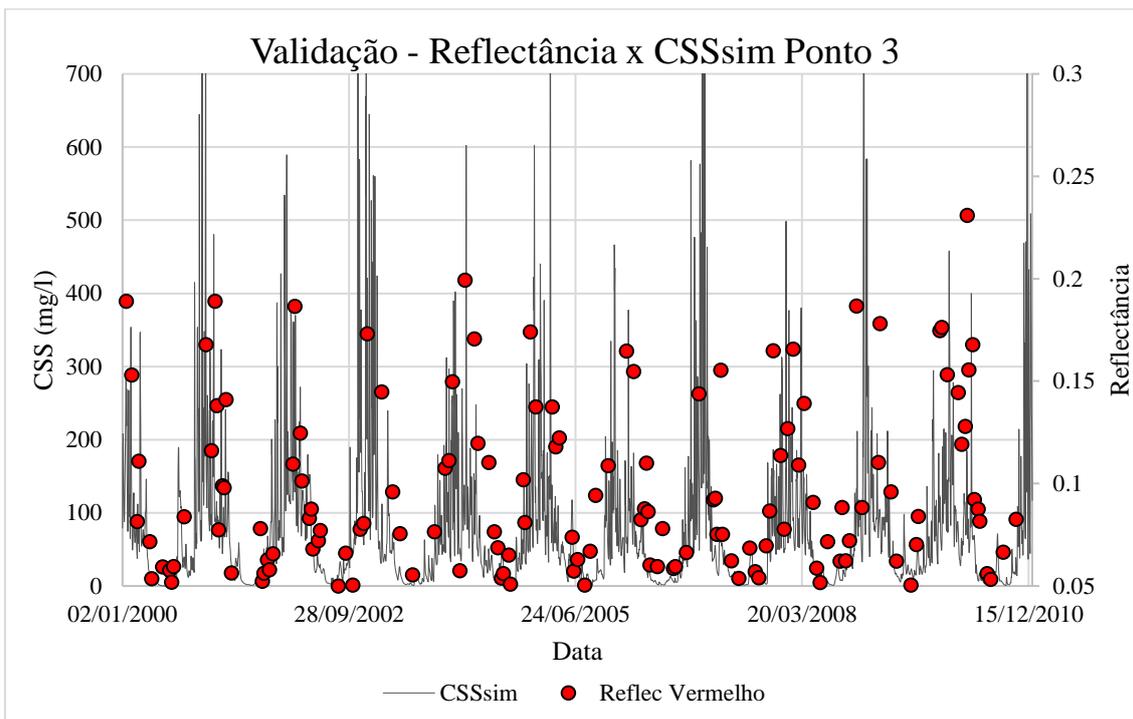
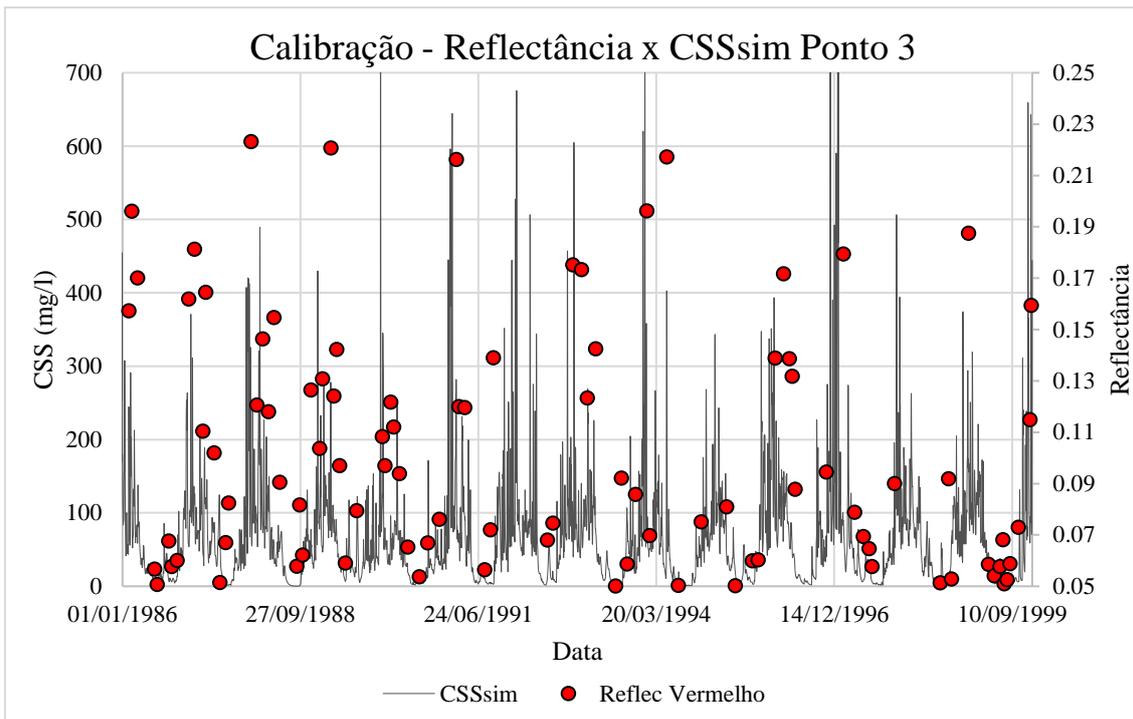
*Comparativo entre a CSS simulada e a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho no ponto 58960000.*



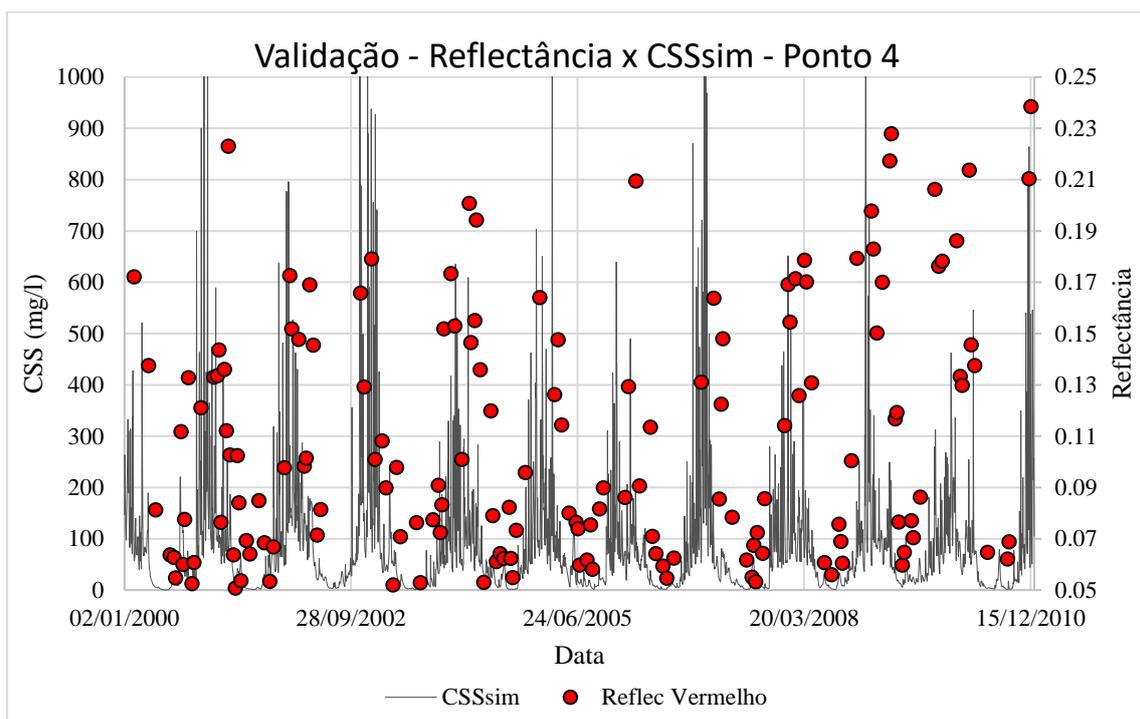
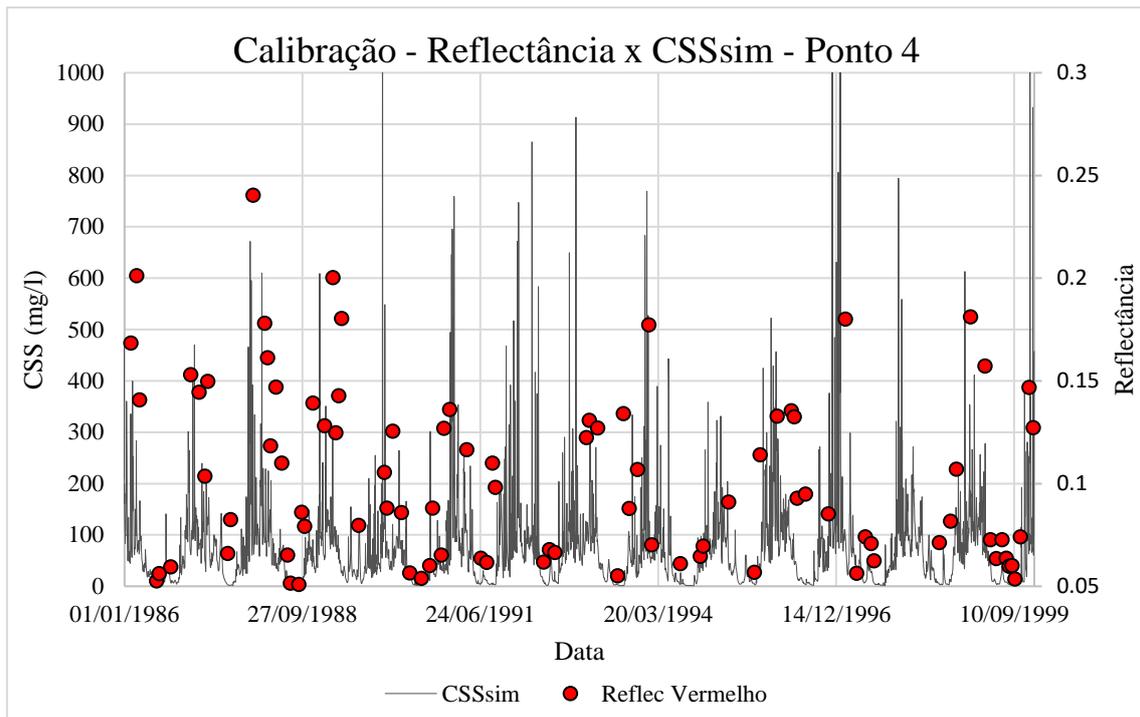
*Comparativo entre a CSS simulada e a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho no ponto 1.*



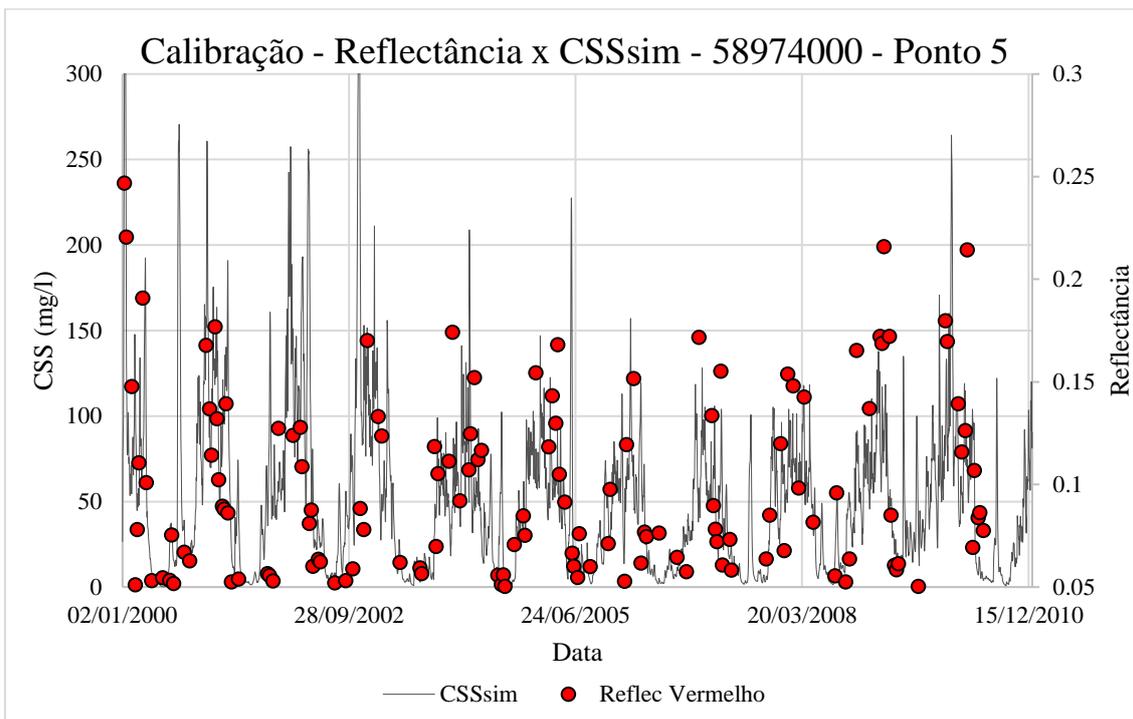
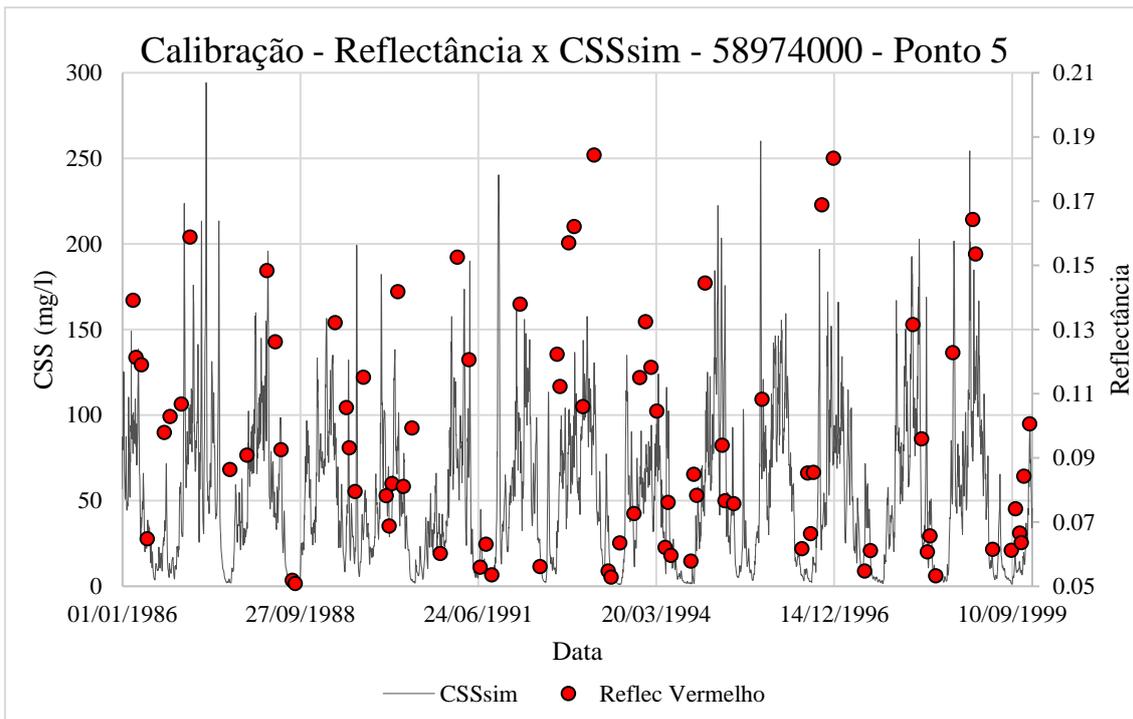
*Comparativo entre a CSS simulada e a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho no ponto 2.*



*Comparativo entre a CSS simulada e a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho no ponto 3.*



*Comparativo entre a CSS simulada e a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho no ponto 4.*



*Comparativo entre a CSS simulada e a reflectância espectral da superfície da banda do vermelho no ponto 5.*