

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL

GUILHERME CENSI

TANK MODEL MODIFICADO PARA ESCOAMENTO E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

PORTO ALEGRE

2019

GUILHERME CENSI

TANK MODEL MODIFICADO PARA ESCOAMENTO E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Orientador: Dr. Gean Paulo Michel

PORTO ALEGRE

2019

GUILHERME CENSI

TANK MODEL MODIFICADO PARA ESCOAMENTO E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Aprovado em: Porto Alegre, 02 de abril de 2019.

Prof. Dr. Gean Paulo Michel – UFRGS
Orientador

Prof. Dr. José Antônio Saldanha Louzada – UFRGS
Examinador

Prof. Dr. Juan Martín Bravo – UFRGS
Examinador

Prof. Dr. Masato Kobiyama – UFRGS
Examinador

Prof. Dr. Pedro Luiz Borges Chaffe – UFSC
Examinador

CIP - Catalogação na Publicação

Censi, Guilherme
Tank Model Modificado para Escoamento e Produção de
Sedimentos / Guilherme Censi. -- 2019.
208 f.
Orientador: Gean Paulo Michel.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Modelagem hidrossedimentológica. 2.
Características da bacia hidrográfica. 3. Análise de
regressão. I. Michel, Gean Paulo, orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a força que governa este universo, qualquer que seja a forma em que se manifeste.

Agradeço a minha família. Agradeço especialmente aos meus pais, Lirio Censi e Sinara Toewe Censi, que sempre me incentivaram a continuar estudando, e ao meu irmão, Gustavo Censi, pela parceria. Vocês são tudo pra mim.

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS pela oportunidade de cursar o mestrado no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH.

Agradeço ao Professor e Orientador, Dr. Gean Paulo Michel, pelo auxílio durante todo o processo de elaboração da pesquisa, mas principalmente pela amizade e pela confiança.

Agradeço aos membros da Banca, Dr. José Antônio Saldanha Louzada, Dr. Juan Martín Bravo, Dr. Masato Kobiyama e Dr. Pedro Luiz Borges Chaffe. Obrigado pelas sugestões e contribuições para melhoria do trabalho.

Agradeço aos colegas do Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais – GPDEN. Obrigado em especial para Karla Campagnolo e Mauricio Paixão. Agradeço também a mais nova integrante do GPDEN, Franciele Vanelli. Muito obrigado por toda a ajuda.

Agradeço aos colegas da Sala da Hidrologia, Adriana Moreira, Benício Monte, Daniela Santini Adamatti, Franciele Zanandrea, Juan Ticono, Leonardo R. Paul e Regina Cadore. Obrigado pelas conversas, momentos de descontração e por me auxiliarem. Cedo um vale abraço para cada um.

Agradeço aos integrantes da República de Bagnold, Franciele Zanandrea, Gean P. Michel, Heron Schwarz, Leonardo R. Paul, Rossano Michel, Thaís Schäfer e Bruno H. Abatti. Muito obrigado por me fazer sentir em casa.

Agradeço aos amigos de longa data, Agatha R. Kons, Beatriz Day, Dayane Dornelles, Emanuel Fusinato, Gabriela Azevedo, Graciela Senci, Lorena F. A. Cara, Luana Loch, Marcio Junior Oliveira, Patrícia H. Zambão, Rebeca Schnitzer e Rodrigo Piva. Obrigado pela amizade verdadeira e duradoura.

Agradeço ao Albert Teixeira Cardoso por disponibilizar os dados necessários para realização da pesquisa.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação até aqui, muito obrigado!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

*O presente determina o futuro,
mas o presente aproximado não determina aproximadamente o futuro.*

Edward Lorenz

RESUMO

O Tank Model é um modelo hidrológico conceitual do tipo chuva-vazão, muito simples, aplicável para diversas situações e objetivos. Sua base conceitual, que considera a representação de sistemas através da associação de reservatórios, é bastante utilizada para desenvolvimento de modelos hidrológicos. O modelo, inicialmente concebido para descrever a produção de escoamento, também vem sendo utilizado para outros fins, tal como simular a produção de sedimentos em bacias hidrográficas. Contudo, a sua utilização é limitada pela escassez de dados hidrológicos/hidrossedimentológicos para calibração dos parâmetros do modelo. Para superar esse problema, pesquisas buscam desenvolver a regionalização do Tank Model para simulação do escoamento a partir da definição de relações entre características da bacia hidrográfica e os parâmetros do modelo. O objetivo da presente pesquisa foi avaliar a aplicação do Tank Model para estimativa do escoamento e da produção de sedimentos em bacias hidrográficas e, como objetivo adicional, testar a regionalização do modelo. O Tank Model foi modificado e a estrutura do modelo foi baseada em dois módulos, um para simulação de escoamento e outro para simulação de descarga de sedimentos. Para o módulo de escoamento foram utilizados dois tanques em série e para o módulo de descarga de sedimentos foi utilizado apenas um tanque. A abordagem em relação ao período simulado foi baseada em eventos hidrossedimentológicos. Considerando a disponibilidade de dados, a área de estudo foi composta por quatro bacias localizadas na região norte de Santa Catarina. Os valores ótimos dos parâmetros do modelo foram determinados por calibração utilizando o algoritmo NSGA-II. As simulações dos escoamentos e das descargas de sedimentos apresentaram boa concordância em relação aos valores observados para a maioria dos eventos hidrossedimentológicos. Para representar as características da bacia foram calculadas 37 métricas relacionadas à fatores morfológicos, geológicos, do solo, da vegetação e climático-hidrológicos. As características da bacia que apresentaram correlação significativa com os parâmetros do Tank Model foram selecionadas para desenvolver a regionalização utilizando o método de regressão linear múltipla. Os indicadores de qualidade da regressão foram satisfatórios e as métricas mais relevantes para explicar os parâmetros do modelo estão relacionadas à declividade, tipo de solo e uso do solo. Os resultados apontaram que o Tank Model pode ser adaptado para uma abordagem hidrossedimentológica e ser utilizado para simular a produção de sedimentos em bacias. Além disso, os resultados indicaram que a regionalização do Tank Model para produção de sedimentos também é viável apesar das limitações da pesquisa.

Palavras-chave: Modelagem hidrossedimentológica. Características da bacia hidrográfica. Análise de regressão.

ABSTRACT

The Tank Model is a very simple hydrologic conceptual model, applicable for different situations and objectives. Its conceptual basis, which considers the representation of systems through the association of reservoirs, is widely used for the development of hydrological models. The model, initially designed to describe runoff, has also been used for other purposes, such as simulating the sediment yield in watersheds. However, the diffusion of its use is limited by the lack of observed data for calibration of the model parameters. To overcome this problem, researches have sought to develop the regionalization of the Tank Model by the definition of relations between watershed characteristics and model parameters. The objective of this work was to evaluate the application of the Tank Model to estimate runoff and sediment yield in watersheds and, as an additional objective, to test the regionalization of the model. The Tank Model was modified, and the structure of the model was based on two modules, one for runoff simulation and the other for sediment discharge simulation. Two tanks were used for the runoff module and only one tank was used for the sediment discharge module. Considering the availability of data, the study area was composed of four watersheds located in the northern region of Santa Catarina. The simulation time was event-based and the optimal values for the Tank Model parameters were determined by calibration using the NSGA-II algorithm. The simulations of runoff and sediment yield were in good agreement with observed data for most events. Then 37 metrics related to morphological, geological, soil, vegetation and climatic-hydrological factors were calculated to describe the watershed characteristics. The characteristics of the watershed that showed significant correlation with the Tank Model parameters were selected to develop the regionalization using the multiple linear regression method. The regression results were satisfactory and the most relevant metrics to explain the parameters of the model are related to watershed slope, soil type and soil use. The results indicated that the Tank Model can be adapted to a hydrosedimentological approach and be used to simulate sediment yield in watersheds. In addition, the results indicate that the regionalization of the Tank Model for sediment yield is also feasible despite the research limitations.

Keywords: Hydrosedimentological modeling. Watershed characteristics. Regression analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais etapas do ciclo hidrossedimentológico	24
Figura 2 – Respingos de água e solo após o impacto de uma gota de chuva	26
Figura 3 – Erosão laminar e erosão em sulcos.....	26
Figura 4 – Erosão em voçoroca.....	27
Figura 5 – Erosão interna do solo.....	27
Figura 6 – Cicatrizes de movimentos de massa.....	28
Figura 7 – Erosão fluvial.....	28
Figura 8 – Representação esquemática do Tank Model original	34
Figura 9 – Tanques na forma linear.....	35
Figura 10 – Tanque linear com entrada, armazenamento e saída	35
Figura 11 – Representação gráfica da função de saída para um tanque linear vazio.....	37
Figura 12 – Tanque na forma não-linear	37
Figura 13 – Diagrama de fluxo de um algoritmo genético típico	42
Figura 14 – Fluxograma metodológico.....	66
Figura 15 – Representação esquemática do Tank Model indicando seus parâmetros e componentes de escoamento e de transferência de sedimentos.....	68
Figura 16 – Localização das estações fluviométricas	71
Figura 17 – Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Cunha	74
Figura 18 – Mapa de Localização das Bacias Hidrográficas RB01, RB10 e RB11	77
Figura 19 – Exemplo de evento hidrossedimentológico	81
Figura 20 – Exemplo de evento de pico de CSS abrupto.....	81
Figura 21 – Definição de precipitação significativa e de intervalo entre eventos	82
Figura 22 – Fluxograma demonstrando as etapas para definição do melhor conjunto de soluções.....	87
Figura 23 – Esquema conceitual demonstrando o cálculo do Índice de Precipitação para Sedimentos	97
Figura 24 – Faixas de variação e incerteza e soluções ótimas da calibração de escoamento para a bacia do Rio Cunha por parâmetro do Tank Model.....	105
Figura 25 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (1) da bacia do Rio Cunha	106
Figura 26 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (2) da bacia do Rio Cunha	106
Figura 27 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (3) da bacia do Rio Cunha	107
Figura 28 – Faixas de variação e incerteza e soluções ótimas da calibração de escoamento para a bacia RB01 por parâmetro do Tank Model.....	108
Figura 29 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (1) da bacia RB01	109
Figura 30 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (2) da bacia RB01	109
Figura 31 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (3) da bacia RB01	110
Figura 32 – Faixas de variação e incerteza e soluções ótimas da calibração de escoamento para a bacia RB10 por parâmetro do Tank Model.....	111
Figura 33 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (1) da bacia RB10.....	112
Figura 34 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (2) da bacia RB10.....	112
Figura 35 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (3) da bacia RB10.....	113
Figura 36 – Faixas de variação e incerteza e soluções ótimas da calibração de escoamento para a bacia RB11 por parâmetro do Tank Model.....	114
Figura 37 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (1) da bacia RB11	115
Figura 38 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (2) da bacia RB11	115
Figura 39 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (3) da bacia RB11	116
Figura 40 – Resultados da validação de escoamento para o evento (4) da bacia do Rio Cunha	118

Figura 41 – Resultados da validação de escoamento para o evento (5) da bacia do Rio Cunha	118
Figura 42 – Resultados da validação de escoamento para o evento (4) da bacia RB01	119
Figura 43 – Resultados da validação de escoamento para o evento (5) da bacia RB01	120
Figura 44 – Resultados da validação de escoamento para o evento (4) da bacia RB10	121
Figura 45 – Resultados da validação de escoamento para o evento (5) da bacia RB10	121
Figura 46 – Resultados da validação de escoamento para o evento (4) da bacia RB11	122
Figura 47 – Resultados da validação de escoamento para o evento (5) da bacia RB11	123
Figura 48 – Resultados do coeficiente de NS para diferentes potências (a) de intensidade de precipitação	124
Figura 49 – Resultados do coeficiente de RMSEI para diferentes potências (a) de intensidade de precipitação	124
Figura 50 – Resultados do coeficiente de RSR para diferentes potências (a) de intensidade de precipitação	125
Figura 51 – Resultados do coeficiente de PBIAS para diferentes potências (a) de intensidade de precipitação	125
Figura 52 – Resultados da calibração de descarga de sedimentos para o Evento (6) da bacia do Rio Cunha	128
Figura 53 – Resultados da calibração de descarga de sedimentos para o Evento (7) da bacia do Rio Cunha	128
Figura 54 – Resultados da calibração de descarga de sedimentos para o Evento (6) da bacia RB01 ..	129
Figura 55 – Resultados da calibração de descarga de sedimentos para o Evento (7) da bacia RB01 ..	130
Figura 56 – Resultados da calibração de descarga de sedimentos para o Evento (6) da Bacia Hidrográfica RB10	131
Figura 57 – Resultados da calibração de descarga de sedimentos para o Evento (7) da Bacia Hidrográfica RB10	131
Figura 58 – Resultados da calibração de descarga de sedimentos para o Evento (6) da Bacia Hidrográfica RB11	132
Figura 59 – Resultados da calibração de descarga de sedimentos para o Evento (7) da Bacia Hidrográfica RB11	133
Figura 60 – Proporção de Classes de Declividade (%) nas bacias hidrográficas da área de estudo	140
Figura 61 – Proporção de Unidades Geológico-Ambientais (%) nas bacias hidrográficas da área de estudo	140
Figura 62 – Proporção de Grupos Hidrológicos de Solo (%) nas bacias hidrográficas da área de estudo	141
Figura 63 – Proporção de Usos do Solo (%) nas bacias hidrográficas da área de estudo.....	141
Figura 64 – Coeficientes de correlação do parâmetro $A0$	143
Figura 65 – Coeficientes de correlação do parâmetro $B0$	143
Figura 66 – Coeficientes de correlação do parâmetro $A1$	144
Figura 67 – Coeficientes de correlação do parâmetro $A2$	144
Figura 68 – Coeficientes de correlação do parâmetro $B1$	145
Figura 69 – Coeficientes de correlação do parâmetro $HA1$	145
Figura 70 – Coeficientes de correlação do parâmetro $HA2$	146
Figura 71 – Coeficientes de correlação do parâmetro $HB1$	146
Figura 72 – Coeficientes de correlação do parâmetro SI	154
Figura 73 – Coeficientes de correlação do parâmetro $S2$	154
Figura 74 – Coeficientes de correlação do parâmetro X	156
Figura 75 – Coeficientes de correlação do parâmetro SMI	156
Figura 76 – Mapa de Declividades da Bacia Hidrográfica do Rio Cunha	180
Figura 77 – Mapa de Unidades Geológico-Ambientais da Bacia Hidrográfica do Rio Cunha	181

Figura 78 – Mapa de Solos da Bacia Hidrográfica do Rio Cunha	182
Figura 79 – Mapa de Grupos Hidrológicos de Solo da Bacia Hidrográfica do Rio Cunha	183
Figura 80 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo da Bacia Hidrográfica do Rio Cunha	184
Figura 81 – Mapa de Declividades das Bacias Hidrográficas RB01, RB10 e RB11	185
Figura 82 – Mapa de Unidades Geológico-Ambientais das Bacias Hidrográficas RB01, RB10 e RB11	186
Figura 83 – Mapa de Solos das Bacias Hidrográficas RB01, RB10 e RB11	187
Figura 84 – Mapa de Grupos Hidrológicos de Solo das Bacias Hidrográficas RB01, RB10 e RB11	188
Figura 85 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo das Bacias Hidrográficas RB01, RB10 e RB11	189

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de modelos hidrológicos/hidrossedimentológicos por critério	31
Tabela 2 – Valores de referência dos parâmetros de calibração do Tank Model	41
Tabela 3 – Relação de trabalhos que aplicaram Tank Model para estimar a produção de sedimentos..	45
Tabela 4 – Fatores descritivos da drenagem da bacia hidrográfica	49
Tabela 5 – Relação de trabalhos sobre regionalização dos parâmetros do Tank Model	54
Tabela 6 – Direção da correlação entre parâmetros do Tank Model e características da bacia hidrográfica	56
Tabela 7 – Qualidade do ajuste de regressão linear múltipla em termos do Coeficiente de Determinação (R^2) por parâmetro do Tank Model e por autores	59
Tabela 8 – Estações fluviométricas	72
Tabela 9 – Estações pluviométricas.....	78
Tabela 10 – Evapotranspiração de referência (ET _o) por mês	80
Tabela 11 – Parâmetros utilizados no algoritmo de separação de eventos hidrossedimentológico por bacia hidrográfica.....	83
Tabela 12 – Parâmetros de calibração e faixa de variação.....	84
Tabela 13 – Lista de métricas estatísticas.....	90
Tabela 14 – Métricas relacionadas às características morfológicas da bacia hidrográfica	91
Tabela 15 – Métricas relacionadas à geologia da bacia hidrográfica	93
Tabela 16 – Métricas relacionadas às características do solo da bacia hidrográfica	93
Tabela 17 – Classificação hidrológica de solos brasileiros	94
Tabela 18 – Métricas relacionadas ao uso do solo da bacia hidrográfica.....	95
Tabela 19 – Métricas relacionadas à fatores climático-hidrológicos da bacia hidrográfica	95
Tabela 20 – Classificação da correlação em grau e direção.....	98
Tabela 21 – Reestruturação das séries de dados após a eliminação das discontinuidades.....	100
Tabela 22 – Número de eventos hidrossedimentológicos por série de dados e por bacia hidrográfica	101
Tabela 23 – Eventos utilizados para calibração de escoamento pelo Tank Model.....	102
Tabela 24 – Eventos utilizados para validação de escoamento pelo Tank Model.....	102
Tabela 25 – Eventos utilizados para calibração de descarga de sedimentos pelo Tank Model	103
Tabela 26 – Desempenho das funções-objetivo <i>NS</i> e <i>RMSEI</i> para a calibração de escoamento dos parâmetros do Tank Model.....	104
Tabela 27 – Desempenho das métricas <i>NS</i> , <i>RMSEI</i> , <i>RSR</i> e <i>PBIAS</i> para a validação de escoamento do Tank Model.....	117
Tabela 28 – Desempenho das métricas <i>NS</i> , <i>RMSEI</i> , <i>RSR</i> e <i>PBIAS</i> para a calibração de descarga de sedimentos do Tank Model	126
Tabela 29 – Valores ótimos dos parâmetros do Tank Model para a calibração de escoamento por evento hidrossedimentológico	134
Tabela 30 – Parâmetros otimizados do Tank Model por bacia hidrográfica.....	134
Tabela 31 – Valores ótimos dos parâmetros do Tank Model para a validação de escoamento por evento hidrossedimentológico	135
Tabela 32 – Valores ótimos dos parâmetros do Tank Model para a calibração de descarga de sedimentos por evento hidrossedimentológico	135
Tabela 33 – Valores para as métricas relacionadas às características morfológicas da bacia hidrográfica	136
Tabela 34 – Valores para as métricas relacionadas à geologia da bacia hidrográfica	137

Tabela 35 – Valores para as métricas relacionadas às características do solo da bacia hidrográfica...	137
Tabela 36 – Valores para as métricas relacionadas ao uso do solo da bacia hidrográfica.....	137
Tabela 37 – Valores para as métricas relacionadas à fatores climático-hidrológicos da bacia hidrográfica: Índice de Precipitação Antecedente	138
Tabela 38 – Valores para as métricas relacionadas à fatores climático-hidrológicos da bacia hidrográfica: Índice de Precipitação para Sedimentos	138
Tabela 39 – Equações de regionalização do Tank Model para simulação de escoamento e descarga de sedimentos.....	158
Tabela 40 – Faixas de aplicação do modelo de regressão.....	164
Tabela 41 – Matriz de correlação das métricas das características da bacia hidrográfica utilizadas na análise de regressão dos parâmetros fundamentais do Tank Model.....	199
Tabela 42 – Matriz de correlação das métricas das características da bacia hidrográfica utilizadas na análise de regressão dos parâmetros relacionados ao armazenamento inicial dos tanques	201
Tabela 43 – Matriz de correlação das métricas das características da bacia hidrográfica utilizadas na análise de regressão dos parâmetros relacionados à condição inicial de sedimentos nos tanques.....	203
Tabela 44 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro $A0$	205
Tabela 45 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro $B0$	205
Tabela 46 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro $A1$	205
Tabela 47 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro $A2$	205
Tabela 48 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro $B1$	206
Tabela 49 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro $HA1$	206
Tabela 50 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro $HA2$	206
Tabela 51 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro $HB1$	206
Tabela 52 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro SI	207
Tabela 53 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro $S2$	207
Tabela 54 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro X	207
Tabela 55 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro SMI	207

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGNPS	Agricultural Non-point Source model
ALOS	Advanced Land Observing Satellite
ANSWERS	Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation
ASF	Alaska Satellite Facility
CIRAM	Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CSS	Concentração de Sedimentos em Suspensão
dUSLE	differentiated Universal Soil Loss Equation
EPAGRI	Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina
ETp	Evapotranspiração potencial
GRG	Método de Programação não-linear do Gradiente Reduzido Generalizado
IAHS	International Association of Hydrological Sciences
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFFSC	Inventário Florístico Florestal de Santa Catarina
IIL	Igual Incremento de Largura
IUSG	Instantaneous Unit Sediment Graph
LabHidro	Laboratório de Hidrologia
MDE	Modelo Digital de Elevação
MUSLE	Modified Universal Soil Loss Equation
NSGA-II	Elitist Nondominated Sorting Genetic Algorithm
PALSAR	Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar
PUB	Predictions in Ungauged Basins
RMSE	Raiz Quadrada do Erro-Médio
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation
SCE	Stuffed Complex Evolution
SCE-UA	Shuffled Complex Evolution Method Developed at the University of Arizona
SCS-CN	Soil Conservation Service Curve Number
SHETRAN	SystemeHydrologique European-TRANsport
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIGSC	Sistema de Informações Geográficas de Santa Catarina
SWAT	Soil Water Assessment Tool
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USG	Unit Sediment Graph
USLE	Universal Soil Loss Equation
WEPP	Water Erosion Prediction Project

LISTA DE SÍMBOLOS

	<i>a</i>	Potência de <i>I</i>	-
	<i>A0</i>	Coefficiente de infiltração do primeiro tanque	min^{-1}
	<i>A1</i>	Coefficiente de escoamento da saída lateral inferior do primeiro tanque	min^{-1}
	<i>A2</i>	Coefficiente de escoamento da saída lateral superior do primeiro tanque	min^{-1}
	<i>Ab</i>	Área da Bacia	km^2
	<i>Am</i>	Altitude Média	m
	<i>B0</i>	Coefficiente de infiltração do segundo tanque	min^{-1}
	<i>B1</i>	Coefficiente de escoamento da saída lateral do segundo tanque	min^{-1}
	<i>Ct</i>	Comprimento do talvegue	km
	<i>CV</i>	Coefficiente de Variação	-
	<i>d</i>	Distância euclidiana entre dois pontos no plano	-
<i>DCGMGLgno</i>		Unidade Geológico-Ambiental - Porção de Área de DCGMGLgno	km^2
<i>DCGR2salc</i>		Unidade Geológico-Ambiental - Porção de Área de DCGR2salc	km^2
	<i>Dd</i>	Densidade de drenagem	km.km^{-2}
	<i>De</i>	Declividade – Porção de Área Escarpado	%
	<i>Dfo</i>	Declividade – Porção de Área Forte Ondulado	%
	<i>Dm</i>	Declividade Média da Bacia	%
	<i>Dmo</i>	Declividade – Porção de Área Montanhoso	%
	<i>Do</i>	Declividade – Porção de Área Ondulado	%
	<i>Dp</i>	Declividade – Porção de Área Plano	%
	<i>Dr</i>	Comprimento da Rede de Drenagem	km
	<i>Dso</i>	Declividade – Porção de Área Suave Ondulado	%
<i>DSVMPasaf</i>		Unidade Geológico-Ambiental - Porção de Área de DSVMPasaf	km^2
	<i>E</i>	Valor estimado ou simulado	-
	\bar{E}	Média dos valores estimados	-
	<i>ETP</i>	Evapotranspiração	mm.min^{-1}
	<i>ETo</i>	Evapotranspiração de referência	mm.mês^{-1}
	<i>f1</i>	Infiltração do primeiro tanque	mm.min^{-1}
	<i>f2</i>	Infiltração do segundo tanque	mm.min^{-1}
	<i>g</i>	Variável da análise correlacional	-
	\bar{g}	Valor médio da variável correlacional	-
	<i>Ghb</i>	Grupo Hidrológico – Porção de Área de Classe B	km^2
	<i>Ghc</i>	Grupo Hidrológico – Porção de Área de Classe C	km^2

<i>Ghd</i>	Grupo Hidrológico – Porção de Área de Classe D	km ²
<i>HA1</i>	Altura da saída lateral inferior do primeiro tanque	mm
<i>HA2</i>	Altura da saída lateral superior do primeiro tanque	mm
<i>HB1</i>	Altura da saída lateral do segundo tanque	mm
<i>I</i>	Intensidade de precipitação	mm.min ⁻¹
<i>Ic</i>	Índice de Circularidade	-
<i>Imax</i>	Precipitação máxima	mm.min ⁻¹
<i>Ipa(1)</i>	Índice de Precipitação Antecedente – 1 Dia	mm.dia ⁻¹
<i>Ipa(2)</i>	Índice de Precipitação Antecedente – 2 Dias	mm.dia ⁻¹
<i>Ipa(3)</i>	Índice de Precipitação Antecedente – 3 Dias	mm.dia ⁻¹
<i>Ipa(4)</i>	Índice de Precipitação Antecedente – 4 Dias	mm.dia ⁻¹
<i>Ipa(5)</i>	Índice de Precipitação Antecedente – 5 Dias	mm.dia ⁻¹
<i>Ipa(6)</i>	Índice de Precipitação Antecedente – 6 Dias	mm.dia ⁻¹
<i>Ipa(7)</i>	Índice de Precipitação Antecedente – 7 Dias	mm.dia ⁻¹
<i>Ips(1)</i>	Índice de Precipitação para Sedimentos – 1 Evento	min ⁻¹
<i>Ips(2)</i>	Índice de Precipitação para Sedimentos – 2 Eventos	min ⁻¹
<i>Kc</i>	Coefficiente de Compacidade	-
<i>Kf</i>	Fator de Forma	-
<i>Lx</i>	Comprimento axial da bacia	km
<i>Mx</i>	Abcissa do ponto M	-
<i>My</i>	Ordenada do ponto M	-
<i>n</i>	Número de observações	-
<i>NS</i>	Coefficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe	-
<i>NS*</i>	Valor normalizado de <i>NS</i>	-
<i>NS_{max}</i>	Valor máximo de <i>NS</i>	-
<i>NS_{min}</i>	Valor mínimo de <i>NS</i>	-
<i>O</i>	Valor observado ou medido	-
\bar{O}	Média dos valores observados	-
<i>p</i>	Probabilidade de significância	-
<i>PBIAS</i>	Bias Percentual	%
<i>Pe</i>	Perímetro da Bacia	km
<i>Q</i>	Escoamento total	mm.min ⁻¹
<i>q1</i>	Escoamento da saída lateral inferior do primeiro tanque	mm.min ⁻¹
<i>q2</i>	Escoamento da saída lateral superior do primeiro tanque	mm.min ⁻¹
<i>q3</i>	Escoamento da saída lateral do segundo tanque	mm.min ⁻¹
<i>R</i>	Coefficiente de Correlação de Pearson	-
<i>R²</i>	Coefficiente de Determinação	-
<i>RMSEI</i>	Raiz Quadrada do Erro-Médio do Inverso da Predição	-
<i>RMSEI*</i>	Valor normalizado de <i>RMSEI</i>	-
<i>RMSEI_{max}</i>	Valor máximo de <i>RMSEI</i>	-
<i>RMSEI_{min}</i>	Valor mínimo de <i>RMSEI</i>	-

<i>RSR</i>	Razão do Erro Médio Quadrático pelo Desvio Padrão dos Dados Observados	-
<i>R_x</i>	Abscissa do ponto R	-
<i>R_y</i>	Ordenada do ponto R	-
<i>S₁</i>	Altura de armazenamento do primeiro tanque	mm
<i>S₂</i>	Altura de armazenamento do segundo tanque	mm
<i>sf₁</i>	Transferência de sedimentos do primeiro tanque	ton.min ⁻¹
<i>SM₁</i>	Massa de sedimentos do primeiro tanque	ton
<i>SQ</i>	Descarga de sedimentos total	ton.min ⁻¹
<i>sq₁</i>	Descarga de sedimentos da saída lateral inferior do primeiro tanque	ton.min ⁻¹
<i>sq₂</i>	Descarga de sedimentos da saída lateral superior do primeiro tanque	ton.min ⁻¹
<i>t</i>	Tempo	-
<i>u</i>	Variável da análise correlacional	-
<i>ū</i>	Valor médio da variável correlacional	-
<i>Us_a</i>	Porção de Área de Agricultura	km ²
<i>Us_e</i>	Porção de Área de Edificação	km ²
<i>Us_f</i>	Porção de Área de Floresta Nativa	km ²
<i>Us_p</i>	Porção de Área de Pastagem	km ²
<i>Us_r</i>	Porção de Área de Reflorestamento	km ²
<i>Us_s</i>	Porção de Área de Solo Exposto	km ²
<i>V</i>	Precipitação acumulada	mm
<i>X</i>	Concentração de sedimentos da bacia	ton.mm ^{-a}
<i>x</i>	Variável independente da regressão linear	-
<i>y</i>	Variável dependente da regressão linear	-
<i>z</i>	Dado	-
<i>z̄</i>	Média dos dados	-
<i>β</i>	Coefficiente da regressão linear	-
<i>β*</i>	Coefficiente da regressão linear normalizado	-
<i>ε</i>	Constante do modelo de regressão linear	-

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2. OBJETIVOS	22
2.1. Objetivo geral.....	22
2.2. Objetivos específicos.....	22
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1. Importância do estudo dos sedimentos	23
3.2. Produção de sedimentos na bacia hidrográfica	24
3.2.1. Destacamento das partículas de solo.....	25
3.2.2. Transporte de sedimentos	25
3.2.3. Deposição de sedimentos.....	29
3.2.4. Fatores que influenciam a taxa de erosão	29
3.2.5. Definição de produção de sedimentos	30
3.3. Modelos hidrológicos/hidrossedimentológicos.....	30
3.3.1. Classificação dos modelos hidrológicos/hidrossedimentológicos	30
3.3.2. Exemplos de modelos para estimativa da erosão e produção de sedimentos	33
3.4. Tank Model	33
3.4.1. Calibração do Tank Model	38
3.4.1.1. Computação evolutiva para otimização de parâmetros	41
3.4.2. Validação do Tank Model	44
3.4.3. Aplicações do Tank Model.....	44
3.4.4. Tank Model para produção de sedimentos.....	44
3.4.5. Regionalização do Tank Model	48
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	66
4.1. Metodologia	66
4.2. Tank Model Modificado.....	67
4.3. Área de estudo	71
4.3.1. Bacia Hidrográfica do Rio Cunha.....	73
4.3.2. Bacias Hidrográficas do Rio dos Bugres	76
4.4. Dados de Precipitação	78
4.5. Dados de evapotranspiração	79
4.6. Análise e tratamento de dados	80
4.7. Calibração do modelo.....	83
4.7.1. Parâmetros de entrada do Tank Model	83

4.7.2.	Funções objetivo.....	85
4.8.	Calibração dos parâmetros para simulação do escoamento	86
4.9.	Validação do modelo para simulação do escoamento	88
4.10.	Calibração dos parâmetros para simulação da descarga de sedimentos	90
4.11.	Características das bacias hidrográficas.....	90
4.12.	Método de Regionalização	97
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	100
5.1.	Análise e tratamento de dados	100
5.2.	Resultados da calibração de escoamento	103
5.2.1.	Resultados da calibração de escoamento para a bacia do Rio Cunha.....	104
5.2.2.	Resultados da calibração de escoamento para a bacia RB01	107
5.2.3.	Resultados da calibração de escoamento para a bacia RB10	110
5.2.4.	Resultados da calibração de escoamento para a bacia RB11	113
5.3.	Resultados da validação de escoamento	116
5.3.1.	Resultados da validação de escoamento para a bacia do Rio Cunha.....	118
5.3.2.	Resultados da validação de escoamento para a bacia RB01	119
5.3.3.	Resultados da validação de escoamento para a bacia RB10	120
5.3.4.	Resultados da validação de escoamento para a bacia RB11	122
5.4.	Resultados da calibração de descarga de sedimentos.....	123
5.4.1.	Resultados da calibração de descarga de sedimentos para a bacia do Rio Cunha	127
5.4.2.	Resultados da calibração de descarga de sedimentos para a bacia RB01	129
5.4.3.	Resultados da calibração de descarga de sedimentos para a bacia RB10.....	130
5.4.4.	Resultados da calibração de descarga de sedimentos para a bacia RB11	132
5.5.	Parâmetros otimizados do Tank Model	133
5.6.	Características das bacias hidrográficas.....	135
5.7.	Resultados da análise correlacional	142
5.7.1.	Correlações dos parâmetros fundamentais.....	142
5.7.2.	Correlações dos parâmetros relacionados ao armazenamento inicial	153
5.7.3.	Correlações dos parâmetros relacionados à condição inicial de sedimentos	155
5.8.	Resultados da regionalização do Tank Model	157
5.9.	Dificuldades e limitações da pesquisa	160
6.	CONCLUSÃO	165
7.	REFERÊNCIAS.....	168
	APÊNDICE A.....	180
	APÊNDICE B	181
	APÊNDICE C	182

APÊNDICE D	183
APÊNDICE E	184
APÊNDICE F	185
APÊNDICE G	186
APÊNDICE H	187
APÊNDICE I	188
APÊNDICE J	189
APÊNDICE K	190
APÊNDICE L	194
APÊNDICE M	196
APÊNDICE N	199
APÊNDICE O	205

1. INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica pode ser entendida como um sistema cuja entrada é a chuva que precipita sobre sua área e as saídas, além da evapotranspiração, são as descargas de água, sedimentos e outras formas de matéria através do seu exutório. Esses processos são explicados pelo ciclo hidrológico e também pelo ciclo hidrossedimentológico, os quais ocorrem de forma concomitante e possuem uma ampla interface na fase terrestre.

O ciclo hidrossedimentológico pode ser definido como um processo aberto que envolve a geração de partículas sólidas (sedimentos) e o seu movimento nos diversos compartimentos ambientais, onde a água atua como principal agente promotor desse processo nas bacias hidrográficas (GUY, 1970; MORGAN, 2005). O ciclo ocorre naturalmente e é responsável pelo delineamento das paisagens terrestres junto a outros processos naturais.

O entendimento do ciclo hidrossedimentológico é de interesse da hidrossedimentologia, ciência que busca compreender a interação entre processos hidrológicos e processos sedimentológicos na bacia hidrográfica (ZANANDREA; KOBAYAMA; MICHEL, 2017). Nesse campo da ciência há crescente esforço pela quantificação, no tempo e no espaço, da produção, transporte e deposição de sedimentos nas bacias hidrográficas (MORGAN, 2005; TOY, 1982). Dada a intensa utilização dos solos para a agricultura e dos recursos hídricos para os mais variados fins, o estudo da hidrossedimentologia passa a ser imprescindível para o entendimento dos processos relacionados à dinâmica da água e dos sedimentos, entre eles os processos erosivos (CARVALHO, 2008).

A modelagem hidrossedimentológica é uma ferramenta que resultou de um processo histórico de avanços na pesquisa em erosão do solo. Com o advento da informática e melhoria da capacidade de processamento de computadores, a utilização de modelos computacionais se tornou acessível e conveniente para avaliar cenários, eliminando, muitas vezes, a necessidade de testes de campo dispendiosos e onerosos (PIERI et al., 2007).

Pesquisas (LEE, 2007; LEE; SINGH, 2005) com o modelo hidrológico Tank Model (SUGAWARA, 1995), cuja utilização para aplicações do tipo chuva-vazão já encontra-se consolidada, testaram também a sua viabilidade para estimar a produção de sedimentos em bacias hidrográficas.

Dentre uma vasta gama de modelos hidrológicos (SINGH, 2018), o Tank Model se destaca por sua simplicidade e aplicabilidade para diversas situações e objetivos. Entretanto, a aplicação de modelos hidrológicos é restrita pela falta de dados para calibração, processo que visa ajustar os parâmetros do modelo até que seja capaz de representar satisfatoriamente a resposta hidrológica de uma determinada bacia hidrográfica.

A falta de dados com escala espaço-temporal adequada é um dos grandes desafios enfrentados pela comunidade de estudiosos da hidrologia. Os custos elevados e as dificuldades técnicas associadas à atividade de monitoramento são determinantes para a escassez de dados hidrológicos, especialmente em pequenas bacias hidrográficas (BELLINASSO; PAIVA, 2007; CHELLA et al., 2005; KIDD et al., 2017). Essa é uma questão que preocupa toda a comunidade de hidrólogos, tanto que a *International Association of Hydrological Sciences – IAHS*, principal organização científica relacionada à ciência de hidrologia, destacou a importância de encontrar soluções para a problemática em sua declaração da década (2003–2012), a *Predictions in Ungauged Basins – PUB*. A declaração promoveu a formulação e implementação de programas

para incentivar a comunidade científica a encontrar meios de aumentar a capacidade de fazer previsões acuradas em bacias sem monitoramento hidrológico (SIVAPALAN et al., 2003). Após uma década de pesquisa, uma das conclusões é de que muito do sucesso alcançado se deu em bacias com monitoramento, enquanto as bacias sem monitoramento permanecem como um desafio em termos de previsões robustas e confiáveis (HRACHOWITZ et al., 2013).

Nesse sentido, ainda há um engajamento para superar a falta de dados hidrológicos buscando alternativas à expansão do monitoramento, que se mostra dificultosa. Quanto ao uso do Tank Model, na vanguarda há trabalhos que testaram métodos para regionalizar o modelo, técnica que busca estabelecer relações entre características da bacia hidrográfica e os parâmetros do modelo. Por outro lado, até então não foi verificada a possibilidade de regionalizar o Tank Model para a estimativa da produção de sedimentos. Nessa linha de pesquisa, o presente trabalho teve como foco explorar a aplicação do Tank Model para produção de sedimentos e, como objetivo adicional, testar a regionalização do modelo.

Na estrutura do trabalho, primeiro são definidos os objetivos. Em seguida é apresentada uma revisão bibliográfica de livros, artigos, dissertações e teses, onde aprofunda-se a discussão acerca do tema. Aborda-se a importância do estudo da produção de sedimentos, o processo de produção de sedimentos em bacias hidrográficas e a utilização de modelagem hidrossedimentológica como ferramenta para o estudo de sedimentos. Ainda na revisão da literatura, descreve-se o funcionamento do Tank Model e são apresentadas as pesquisas que propuseram a sua aplicação para estimativa da produção de sedimentos, bem como pesquisas que testaram a regionalização do modelo. Na seção de materiais e métodos do trabalho, a metodologia empregada para atingir os objetivos do trabalho é apresentada, incluindo a adaptação do Tank Model para produção de sedimentos, o método de regionalização do modelo e a área de estudo. Na seção de resultados e discussão, os resultados da pesquisa são apresentados e discutidos. Por fim, são apresentadas as principais conclusões do trabalho e são feitas recomendações para estudos futuros.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar a aplicação do Tank Model para estimativa do escoamento e da produção de sedimentos em bacias hidrográficas.

2.2. Objetivos específicos

- Adaptar o Tank Model para estimativa do escoamento e da produção de sedimentos em bacias hidrográficas;
- Determinar os valores otimizados dos parâmetros do Tank Model para estimativa do escoamento e da produção de sedimentos das bacias hidrográficas da área de estudo;
- Estabelecer relações matemáticas entre os parâmetros do Tank Model e as características da bacia hidrográfica;
- Investigar quais características das bacias hidrográficas são mais relevantes para a regionalização do Tank Model.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Importância do estudo dos sedimentos

Toy (1982), já na década de 1980, alegava que a erosão do solo podia ser considerada o problema ambiental mais sério do mundo. Décadas depois, o quadro não se alterou e a erosão dos solos ainda se constitui como um problema de escala global (FERNÁNDEZ-RAGA et al., 2017). Apesar de atingir de forma mais séria os países em desenvolvimento, essa problemática também é motivo de preocupação em países tecnologicamente adiantados (GUERRA, 1994).

A intensa utilização dos solos e dos recursos hídricos para os mais variados fins, agravada pelo crescimento econômico e pela pressão populacional, tem tornado cada vez mais importante a quantificação, no tempo e no espaço, da geração, transporte e deposição de sedimentos nas bacias hidrográficas (BRANCO, 1998). A preocupação cresce na medida em que as consequências decorrentes da mudança climática ainda permanecem no campo da incerteza, mas com pesquisas indicando a possibilidade de que o problema da erosão pode ser intensificado num futuro próximo (LI; FANG, 2016).

Os problemas causados pelos sedimentos podem ocorrer *in situ*, no local de origem dos sedimentos, ou *ex situ*, em áreas externas à sua origem, no trecho onde transitam e/ou no local de sua deposição. Além disso, esses impactos, seja no local de geração do sedimento ou além da sua origem, podem assumir caráter econômico, social e/ou ambiental.

Os efeitos localizados gerados pela erosão são especialmente importantes em áreas agrícolas. Dentre a gama de impactos estão a perda de solo, a redução da profundidade de solo agricultável, a perda de nutrientes e matéria orgânica, o declínio da fertilidade do solo, a diminuição da área agricultável disponível, os danos às plantações e prejuízos econômicos relacionados à redução de vendas (TELLES; GUIMARÃES; DECHEN, 2011). A erosão também reduz a umidade do solo disponível, resultando em condições mais propensas à seca (MORGAN, 2005).

A principal consequência da erosão acelerada é a perda de produtividade agrícola. A perda de solo fértil restringe o que pode ser cultivado e resulta em aumento de despesas com fertilizantes para manter os rendimentos. A consequente desvalorização e abandono de terras, além da queda na produção de alimentos acabam por comprometer a segurança alimentar (MORGAN, 2005).

Os problemas fora do local de geração dos sedimentos decorrem da deposição a jusante. A sedimentação reduz a capacidade dos rios e valas de drenagem, bloqueia os canais de irrigação e reduz a vida útil dos reservatórios. Como resultado da redução da capacidade de drenagem há o aumentando do risco de inundações e alagamentos. O sedimento também pode atuar como vetor de poluentes por meio do transporte de produtos químicos adsorvidos nas partículas. Quando alcançam os corpos hídricos, as substâncias adsorvidas podem ser liberadas e, dependendo da composição química, podem desencadear o processo de eutrofização devido ao aumento dos níveis de nitrogênio e fósforo (TELLES; GUIMARÃES; DECHEN, 2011).

Os custos de erosão no local são basicamente suportados pelo agricultor, embora possam ser repassados em parte à comunidade por meio do aumento do preço de alimentos à medida que os rendimentos diminuem ou quando a terra torna-se improdutiva (MORGAN, 2005).

Em termos econômicos relacionados à agricultura, somente nos Estados Unidos, o custo associado à erosão do solo é estimado em US\$ 44,0 bilhões por ano (PIMENTEL et al., 1995). Na União Europeia, a perda de produção agrícola anual chega ao patamar de €1,2 bilhão (PANAGOS et al., 2018). No Brasil, estima-se que os custos da erosão do solo relacionados às perdas de nutrientes em lavouras seriam da ordem de US\$ 1,3 bilhão ao ano (DECHEN et al., 2015).

O entendimento dos processos erosivos abruptos como escorregamentos também é importante, pois os impactos desses eventos tendem a ser bastante severos. Quando ocorrem em regiões povoadas, os escorregamentos podem ocasionar vítimas fatais e perdas econômicas de grande vulto, além dos impactos aos meios físico e biótico (MARTINI et al., 2006).

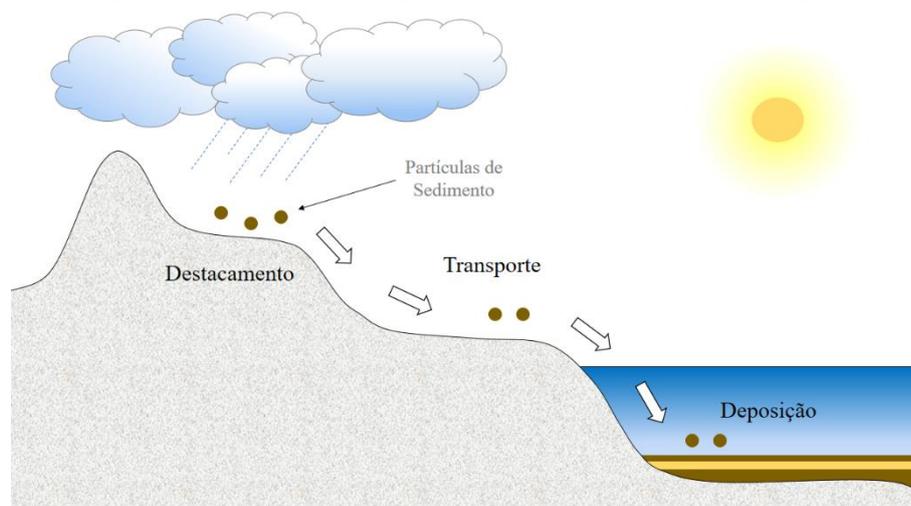
Dado o exposto, avanços no estudo de sedimentos são fundamentais para o mapeamento de áreas vulneráveis a problemas ambientais, para elaboração de políticas públicas de planejamento, bem como para a formação de instrumentos de previsão, prevenção e remediação de impactos ambientais (SANTOS SILVA, 2015).

3.2. Produção de sedimentos na bacia hidrográfica

A produção de sedimentos a partir de uma bacia hidrográfica é o resultado do processo de erosão do solo e, em geral, seu valor é de difícil estimativa tendo em vista a complexidade dos processos hidro-geológicos, os quais envolvem grande número de variáveis e intrincadas interações (BHUNYA et al., 2010).

A erosão pluvial é influenciada por fatores relacionados ao clima, ao solo, à topografia e ao uso do solo (WISCHMEIER; SMITH, 1978). Em geral, costuma-se classificar a erosão na bacia hidrográfica em três etapas distintas: destacamento de partículas de solo, transporte por agentes erosivos e deposição (WISCHMEIER; SMITH, 1965). A Figura 1 ilustra essas etapas que compõem o ciclo hidrossedimentológico.

Figura 1 – Principais etapas do ciclo hidrossedimentológico



3.2.1. Destacamento das partículas de solo

O destacamento consiste na primeira etapa de erosão, onde a massa de solo é desaglomerada em partículas de solo individuais. Tal processo é consequência de um trabalho mecânico sustentado pela energia das gotas de chuva e pela energia do escoamento da água agindo sobre o solo.

As gotas de chuva são o agente mais importante de destacamento do solo. Enquanto caem através da atmosfera as gotas adquirem energia cinética e, quando atingem a superfície da bacia, o impacto sobre a massa de solo é capaz de destacar partículas de sedimento. A exposição contínua a precipitações intensas, num efeito cumulativo, enfraquece consideravelmente o solo (MORGAN, 2005).

A corrente de água que se forma na superfície também contribui para o destacamento das partículas de solo. O escoamento da água transmite tensões normal e cisalhante sobre a superfície da bacia hidrográfica. As tensões aplicadas pelo escoamento estão amplamente distribuídas por vastas áreas da bacia e são menos localizadas do que as tensões geradas pelas gotas de chuva (MISRA; TEIXEIRA, 2001).

De acordo com Morgan (2005), o solo também pode ser destacado por processos de intemperismo causado por fatores físicos, químicos e biológicos, tal como umedecimento e secagem, congelamento e descongelamento, ação de gelo e agentes bioquímicos. Todos esses processos enternecem o solo, tornando-o facilmente removível por agentes de transporte como a água.

3.2.2. Transporte de sedimentos

O transporte de sedimentos consiste no processo de remoção das partículas destacadas do solo para além do seu lugar de origem, desde que haja energia suficiente para superar a inércia das partículas em estado de repouso. Geralmente, o material disponível para transporte existente nas vertentes da bacia tem sua origem no destacamento causado pelo impacto da gota da chuva sobre a massa de solo.

Os grupos de agentes de transporte compreendem aqueles que contribuem para a remoção de uma espessura relativamente uniforme do solo e aqueles que concentram sua ação em canais.

No primeiro grupo, há o processo denominado salpicamento ou erosão da chuva, que é resultado do impacto de gotas de chuva que atingem a superfície do solo, fazendo as partículas do solo, já destacadas, serem jogadas pelo ar a distâncias de alguns centímetros (MORGAN, 2005), conforme a Figura 2.

A erosão laminar também atua removendo uma espessura relativamente uniforme do solo da bacia hidrográfica. Nesse tipo de erosão há o transporte de partículas pelo escoamento da água em lâminas líquidas entre os sulcos do terreno, como demonstra a Figura 3. Por essa característica, esse tipo de erosão também é conhecido como erosão entressulcos.

Compõem o grupo de agentes de transporte que concentram sua ação em canais os mecanismos de erosão em sulcos, erosão em ravinas e voçorocas, erosão interna do solo, erosão fluvial e erosão por movimentos de massa (MORGAN, 2005).

Figura 2 – Respingos de água e solo após o impacto de uma gota de chuva



Fonte: Favis-Mortlock (2017).

A erosão em sulcos (Figura 3) é caracterizada pela concentração de água em pequenos canais da superfície do terreno, conhecidos como sulcos (MORGAN, 2005). Em alguns casos, a erosão pode se dar de forma mais vultuosa quando os sulcos evoluem para ravinas e voçorocas, grandes valas com dezenas de metros de profundidade e largura (Figura 4).

Figura 3 – Erosão laminar e erosão em sulcos



Fonte: United States Department of Agriculture (2011).

Figura 4 – Erosão em voçoroca



Fonte: Pulley et al. (2018).

Há também a possibilidade de a erosão ocorrer internamente pelo fluxo de água abaixo da superfície do solo, chamada de erosão interna do solo. Partículas finas podem ser transportadas através dos poros do solo por esse processo e, nesse tipo de erosão, a concentração de minerais dissolvidos na água é expressiva. Nesse processo, nutrientes essenciais para o desenvolvimento de plantas podem ser removidos, tornando o solo pobre e menos resistente à outras formas de erosão (MORGAN, 2005). Em alguns casos, ao longo do tempo os pequenos poros do solo podem gradualmente assumir maiores dimensões e se tornarem grandes canais internos do solo como mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Erosão interna do solo



Fonte: Schneider (2014).

A erosão também pode ocorrer de forma abrupta e em grandes volumes pelos processos de movimentos de massa (Figura 6), tal como escorregamentos, em que ocorre o movimento não fluidizado de solo e rocha (SOARES; SOARES; FIORI, 2002), e fluxo de detritos, em que há o movimento de massa de sedimentos fluidizado (TAKAHASHI, 2014).

Figura 6 – Cicatrizes de movimentos de massa



Fonte: Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (2017).

Os sedimentos transportados para além do ponto de geração geralmente alcançam cursos d'água em função da confluência determinada pelo relevo do terreno. Os rios também podem erodir o material de fundo e de suas margens (Figura 7), compreendendo a erosão fluvial (MORGAN, 2005). Todo material erodido pelo rio e por ele transportado compõe a sua carga de sedimentos, que pode ser dissolvida, em suspensão e/ou do leito.

Figura 7 – Erosão fluvial



Fonte: Smith (2013).

A carga dissolvida é constituída pelos íons e moléculas derivados do intemperismo químico e da decomposição dos componentes biogênicos presentes na água ou transportados até a água (FLORENZANO, 2008).

A carga em suspensão é formada por partículas sólidas, como siltes, argilas e pequenas partículas orgânicas, cuja dimensão e peso permitem que sejam mantidas suspensas pela turbulência e pelos vórtices do fluxo de água no canal. Partículas de areia também podem ser mantidas em suspensão por correntes fortes, mesmo que por curtos períodos. A maior concentração de partículas suspensas é encontrada próximo ao fundo do canal, havendo a tendência de redução da concentração em direção à superfície do rio (FLORENZANO, 2008).

A carga do leito consiste, em geral, de cascalhos de grande dimensão e seixos, os quais são transportados no fundo ou próximos ao fundo do canal por meio dos mecanismos de arraste, saltação e/ou suspensão (SHEN, 1976). As partículas de sedimento transportadas por arraste rolam ou deslizam sobre a superfície do leito. Aquelas transportadas por saltação sofrem elevação para dentro do escoamento e posteriormente retornam à superfície do leito. Já as partículas levadas em suspensão são sustentadas pelo fluido acima da superfície do leito durante todo o transporte.

Geralmente os sedimentos transportados pelos rios podem ser depositados ao longo do percurso e remobilizados em outra ocasião, ou então exportados diretamente para fora da bacia hidrográfica através de seu exutório.

3.2.3. Deposição de sedimentos

Quando o sedimento encontra condições desfavoráveis ao seu transporte, ou seja, no momento em que não há mais energia suficiente disponível para transportar as partículas, ocorre o processo de deposição (MORGAN, 2005).

A deposição geralmente se dá em locais mais baixos, tal como em encostas de declividade mais suave e em depressões naturais do terreno. Nesse caso, o sedimento é depositado antes de alcançar o curso d'água (CARVALHO, 2008). Muitas vezes o sedimento fica depositado em determinados locais temporariamente, sendo transportado por eventos hidrossedimentológicos subsequentes (FOSTER; MEYER, 1975).

3.2.4. Fatores que influenciam a taxa de erosão

Os fatores que influenciam a taxa ou intensidade da erosão podem ser considerados sob três aspectos: energia, resistência e proteção.

O grupo de fatores relacionados à energia inclui a capacidade potencial da chuva e do escoamento para causar erosão. Essa habilidade de destacar as partículas do solo e transportá-las é denominada erosividade da chuva. Nesse grupo também estão incluídos os fatores que afetam diretamente o poder de ação dos agentes erosivos. Exemplo disso é o comprimento da rampa de escoamento, sendo que quanto menor a rampa, menor o tempo de influência do agente erosivo e conseqüentemente menor a taxa de erosão na vertente.

O grupo de resistência é representado pela erodibilidade do solo, que depende das propriedades mecânicas e químicas de resistência da massa de solo aos efeitos de destacamento de partículas causados por agentes erosivos (MORGAN, 2005).

Por último, o grupo de proteção é composto pelos elementos de exposição do solo aos agentes erosivos, sendo o principal elemento desse grupo a vegetação. Quanto mais exposto o solo, maior é a suscetibilidade à ação dos agentes erosivos. Ao interceptar as chuvas e reduzir a velocidade do escoamento, a cobertura da planta pode proteger o solo da erosão, oferecendo diferentes graus de proteção (MORGAN, 2005). Em solos mais úmidos, a vegetação geralmente impede ou reduz o destacamento e o transporte pelo escoamento. No entanto, períodos muito chuvosos podem elevar a taxa de erosão e arraste de partículas destacadas, mesmo em áreas vegetadas (AKSOY; KAVVAS, 2005).

A influência humana, ao determinar o uso da terra, pode controlar a taxa de erosão em um grau considerável, de modo que o processo de erosão pode ocorrer de forma acelerada quando há ação antrópica sobre a bacia hidrográfica. As atividades humanas, como supressão da vegetação natural, pecuária e o preparo inadequado da terra para agricultura, podem intensificar o destacamento de partículas do solo, tornando-o assim mais suscetível à erosão (TOY, 1982).

3.2.5. Definição de produção de sedimentos

De acordo com Walling (1983), produção de sedimentos é o termo utilizado para descrever a quantidade de sedimentos que atravessa a seção de saída da bacia hidrográfica, ou seja, seu exutório.

Apenas uma pequena fração do sedimento erodido na bacia hidrográfica alcança o exutório, contribuindo efetivamente para a produção de sedimentos. Como já mencionado, a deposição e armazenamento temporário ou permanente dos sedimentos pode ocorrer ainda dentro dos limites da bacia hidrográfica, seja na vertente, em vales, na planície de inundação ou no próprio canal. Assim, quando a deposição de partículas ocorre dentro da própria bacia em que foram geradas, essas partículas não contribuem para a produção de sedimentos.

O valor de produção de sedimentos geralmente é dado em termos da quantidade de massa de sedimentos que atravessa o exutório da bacia hidrográfica em relação à área de contribuição de drenagem (i. e. área da bacia) e em relação ao tempo (WALLING, 1983).

3.3. Modelos hidrológicos/hidrossedimentológicos

Para Capra (p. 383, 2000), “todas as teorias e modelos científicos são aproximações da verdadeira natureza das coisas; o erro envolvido na aproximação é, não raro, suficientemente pequeno para tornar significativa essa aproximação”. Conforme Sayão (2001), um modelo é uma abstração ou representação simplificada e inteligível de um domínio ou campo de estudo. É uma criação destinada a representar uma realidade, ou alguns de seus aspectos, de modo a torná-los descritíveis em termos qualitativos e/ou quantitativos.

Um modelo hidrológico é definido como uma representação matemática do fluxo de água e sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre (MAIDMENT, 1993). Nessa mesma perspectiva e considerando a definição de hidrossedimentologia (ZANANDREA; KOBAYAMA; MICHEL, 2017), um modelo hidrossedimentológico pode ser definido como uma representação matemática da interação entre processos hidrológicos e sedimentológicos (destacamento, transporte e deposição de sedimentos) na bacia hidrográfica, em diferentes escalas temporais e espaciais.

3.3.1. Classificação dos modelos hidrológicos/hidrossedimentológicos

Dado que o ciclo hidrossedimentológico é fortemente vinculado e dependente do ciclo hidrológico, a modelagem computacional desses ciclos ou de parte deles geralmente considera uma mesma gama de fenômenos e processos, sendo a principal diferença a resposta fornecida

por cada tipo de modelo. Assim, a classificação de modelos hidrológicos e hidrossedimentológicos pode ser considerada equivalente em diversos aspectos.

Os modelos hidrológicos/hidrossedimentológicos podem ser classificados em termos de processos considerados, leis e pressupostos, equações, parâmetros, complexidade, dados de entrada necessários e aplicações, entre outras características. Baseado nos trabalhos de Refsgaard (1996), Sagara (2001), Jajarmizadeh, Harun e Salarpour (2012) e Marinho Filho et al. (2012), as principais classes de modelos hidrológicos/hidrossedimentológicos são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Classes de modelos hidrológicos/hidrossedimentológicos por critério

Critério	Classe de Modelo	Descrição
Leis e Pressupostos	Fisicamente embasado	Descreve o sistema natural usando equações matemáticas fundamentais de fluxo de massa, momento e várias formas de energia. A maioria dos parâmetros pode ser medida diretamente.
	Conceitual	Equações e estruturas fisicamente embasadas são utilizadas em conjunto com semi-empíricas. Os parâmetros não podem ser medidos diretamente e necessitam de calibração utilizando-se para isso dados medidos em campo.
	Empírico	Modelo é desenvolvido sem considerar os processos físicos que ocorrem na bacia hidrográfica, sendo simplesmente baseado em análises de séries temporais de entrada e saída simultâneas.
Equações	Determinístico	Modelo em que dois conjuntos iguais de entrada (i. e. coleções de sinais) sempre produzem o mesmo sinal de saída se forem executados através do modelo em condições idênticas. Não possui operações internas com um comportamento estocástico.
	Probabilístico (estocástico)	Possui ao menos uma componente com característica randômica que não é explícita na entrada do modelo. Assim, dois conjuntos iguais de entrada geralmente resultam em diferentes saídas, mesmo se executados em condições idênticas.
Parâmetros	Distribuído	Leva em consideração as variações espaciais em todas as variáveis e parâmetros.
	Concentrado	A bacia hidrográfica é representada como uma unidade. As variáveis e parâmetros são representados por valores médios para toda a bacia.
Tempo	Por evento	Objetiva a modelagem de períodos isolados da série de dados.
	Contínuo	Busca representar longos períodos da série, muitas vezes, contemplando épocas de comportamentos hidrológicos diferentes.
Linearidade	Linear	O modelo é implementado para simular comportamentos lineares.
	Não-linear	O modelo é implementado para simular comportamentos não-lineares.

O critério mais importante de classificação se refere às leis e pressupostos utilizados na construção do modelo hidrológico/hidrossedimentológico. Por esse critério há três classes básicas: fisicamente embasados, conceituais e empíricos.

Os modelos fisicamente embasados representam matematicamente os fenômenos hidrológicos por meio de equações fundamentais. Esses modelos não apenas representam os mecanismos essenciais que governam os fluxos de água e sedimentos na bacia hidrográfica mas também consideram características físicas, como topografia, geologia, uso do solo, clima, crescimento da vegetação e características do fluxo no rio (PANDEY et al., 2016).

Esses tipos de modelo em geral são mais acurados, pois representam melhor os processos hidrológicos, tal como erosão e deposição de sedimentos. Por outro lado, para alcançar bons resultados os modelos fisicamente embasados requerem muitos dados de entrada e parâmetros para simulação, além de necessitar de mais processamento (PANDEY et al., 2016).

Já nos modelos conceituais, a bacia hidrográfica é representada por meio de esquemas conceituais, fazendo uma descrição genérica e limitada em termos da física envolvida nos processos hidrológicos (SOROOSHIAN, 1991). Nesse tipo de modelo, geralmente a bacia hidrográfica é representada como uma série de reservatórios verticais que reproduzem os diferentes níveis de armazenamento de água na parte terrestre do ciclo hidrológico (STANESCU; MUSY, 2006).

Para superar dificuldades associadas aos modelos distribuídos, tais como a complexidade da formulação matemática e a necessidade de dados espaciais em boa escala, pesquisadores desenvolveram modelos semi-distribuídos como uma combinação entre modelos concentrados e modelos totalmente distribuídos. Segundo Arnold, Allen e Bernhardt (1993), os algoritmos por trás dos modelos conceituais semi-distribuídos são simples, porém são fisicamente embasados. A bacia hidrográfica é dividida em porções menores e a média das características físicas de cada porção é usada para representar a heterogeneidade espacial. Portanto, esses modelos são capazes de combinar os efeitos distribuídos das áreas de contribuição e os parâmetros são estimados a partir de medições em campo (JAJARMIZAD; HARUN; SALARPOUR, 2012).

Os modelos empíricos se baseiam na observação, coleta e análise de grande quantidade de dados sobre os fenômenos hidrológicos estudados. São baseados em relações empíricas, e por esse aspecto, a aplicabilidade desses modelos é limitada à condição para a qual foram desenvolvidos (AKSOY; KAVVAS, 2005).

A desconsideração da variabilidade espacial das características da bacia e a utilização de pressupostos que não representam a realidade da física envolvida nos fenômenos estudados são as principais críticas ao uso de modelos empíricos (WHEATER; JAKEMAN; BEVEN, 1993). Por outro lado, esse tipo de modelo exige menor poder de processamento computacional, pois incorpora pequena quantidade de variáveis causais. Além disso, modelos empíricos podem trabalhar com medidas mais grosseiras e dados limitados (JAKEMAN et al., 1999).

3.3.2. Exemplos de modelos para estimativa da erosão e produção de sedimentos

Existem diversos modelos que propõem estimar a erosão do solo e a produção de sedimentos em bacias hidrográficas. Os modelos diferem em termos de processos considerados, complexidade, exigência de dados e aplicação. Assim, no momento do usuário definir qual modelo usar vários fatores afetam a escolha, tal como variáveis de entrada e saída, disponibilidade de dados, objetivos, capacidade do modelo, eficiência e requisitos de hardware (PANDEY et al., 2016).

Dentre os modelos empíricos, há o modelo Langbein-Schumm (LANGBEIN; SCHUMM, 1958), o modelo de Poesen (POESEN, 1985) e a *Universal Soil Loss Equation* – USLE (WISCHMEIER; SMITH, 1965). Mais tarde, a USLE foi modificada por diversos pesquisadores, surgindo daí os modelos: *Modified Universal Soil Loss Equation* – MUSLE (WILLIAMS, 1975); *differentiated Universal Soil Loss Equation* – dUSLE (FLACKE; AUERSWALD; NEUFANG, 1990); *Revised Universal Soil Loss Equation* – RUSLE (RENARD et al., 1997); e USLE-M (KINNEL; RISSE, 1998).

Exemplos de modelos conceituais incluem o modelo de Sedimentograma Unitário – USG (do inglês *Unit Sediment Graph*) desenvolvido por Rendon-Herrero (1978) e os modelos de Sedimentograma Unitário Instantâneo – IUSG (do inglês *Instantaneous Unit Sediment Graph*) propostos por: Williams (1978); Singh, Baniukiwicz e Chen (1982); Singh et al. (2008); Kumar e Rastogi (1987); Raghuwanshi, Rastogi e Kumar (1994); Gracia-Sánchez (1996). Na literatura também encontra-se o modelo conceitual criado por Osawa e Sakai (2002), o Tank Model (LEE; SINGH, 2005; SUGAWARA, 1995) e o modelo de sedimentograma baseado no método do *Soil Conservation Service Curve Number* – SCS-CN proposto por Bhunya et al. (2010).

Pandey et al. (2016) realizaram a revisão de 50 modelos fisicamente embasados para estimativa da erosão e produção de sedimentos. De acordo com os autores, dentre os modelos analisados, os cinco mais promissores são: *Soil Water Assessment Tool* – SWAT (ARNOLD et al., 1998), *Water Erosion Prediction Project* – WEPP (LAFLEN; LANE; FOSTER, 1991), *Agricultural Non-point Source model* – AGNPS (YOUNG et al., 1989), *Areal Nonpoint Source watershed Environment Response Simulation* – ANSWERS (BEASLEY; HUGGINS; MONKE, 1980), *SystemeHydrologique European-TRANsport* – SHETRAN (EWEN; PARKIN; O’CONNELL, 2000).

3.4. Tank Model

As primeiras versões do Tank Model como uma ferramenta para modelagem hidrológica foram propostas por Sugawara e Maruyama (1951, 1956) e por Sugawara (1961), porém, a versão mais conhecida atualmente foi proposta por Sugawara (1967). Mais tarde, o modelo foi sendo melhorado com a definição de metodologia para calibração automática, inclusão da contribuição proveniente do derretimento da neve, consideração da umidade do solo, e adaptações para aplicação em regiões áridas (SUGAWARA, 1979, 1984, 1995).

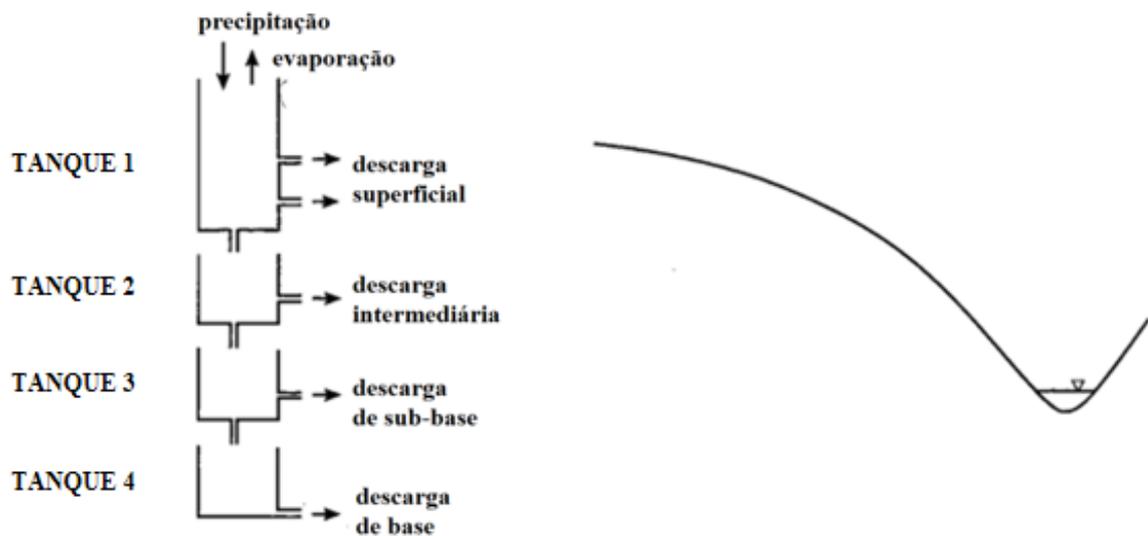
O Tank Model é um modelo conceitual muito simples. Apesar de ser considerado por muitos como empírico, há fortes evidências que podem lhe dar significado físico, como por

exemplo a presença de camadas geológicas que armazenam água em seu interior e que podem ser representadas conceitualmente como uma estrutura de tanques (SUGAWARA, 1995). Além disso, em sua concepção inicial, o modelo pode ser enquadrado como determinístico, concentrado, não-linear, baseado em eventos ou contínuo.

O Tank Model faz parte do grupo de modelos que descrevem a relação entre a precipitação e o escoamento superficial usando o conceito de reservatórios não-lineares interligados, chamados de modelos de reservatórios. Outros exemplos de modelos desse grupo são o modelo *Soil Moisture Accounting Procedure* – SMAP (LOPES, 1982), o Modelo Hidrológico Auto-Calibrável – MODHAC (LANNA, 1997) e o modelo GR4J (PERRIN; MICHEL; ANDRÉASSIAN, 2003).

A versão consolidada do Tank Model foi concebida como um conjunto de quatro tanques dispostos verticalmente em série, os quais representam esquematicamente a estratificação das camadas do solo entre a superfície e a base, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Representação esquemática do Tank Model original



Fonte: adaptado de Sugawara (1995).

A construção matemática do Tank Model conta com diversos parâmetros e variáveis. Nas expressões matemáticas ou enunciados lógicos do modelo matemático, os parâmetros são elementos que permanecem constantes em relação ao tempo virtual, enquanto as variáveis são elementos que variam no tempo (REFSGAARD, 1996).

Os parâmetros do Tank Model podem ser classificados em dois tipos: aqueles que refletem processos hidrológicos e aqueles que refletem alturas iniciais de armazenamento de água nos tanques (AMIRI et al., 2016). Os parâmetros associados aos processos hidrológicos estão intimamente relacionados com as componentes de escoamento referentes à infiltração e saídas laterais do modelo. Já os parâmetros de armazenamento surgem da hipótese de que as camadas de solo funcionam como reservatórios de água. O armazenamento do primeiro tanque é determinado pela precipitação, escoamento, infiltração e evaporação, enquanto o armazenamento dos demais tanques é determinado principalmente pela infiltração e escoamento.

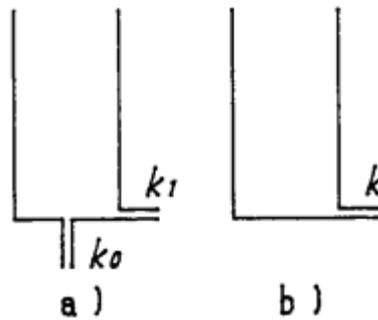
A precipitação, evaporação e infiltração são variáveis e representam as componentes de escoamento vertical do modelo. A precipitação é adicionada no tanque do topo, enquanto a evaporação é subtraída como a perda de água para a atmosfera e abaixo há infiltração para o tanque inferior. Se não há água no tanque do topo, a evaporação é subtraída a partir do segundo tanque. Se não há água no primeiro tanque e nem no segundo, a água então é subtraída do terceiro tanque, e assim por diante.

As saídas laterais dos tanques também são variáveis do modelo e representam as componentes horizontais de escoamento. A saída do primeiro tanque simula o escoamento superficial, enquanto a saída do segundo tanque simula o escoamento intermediário, a saída do terceiro tanque o escoamento de sub-base e a saída do quarto tanque o escoamento de base.

A descrição matemática do modelo em sua concepção simples para tanques lineares e não-lineares é apresentada por Sugawara (1995).

Movendo a saída lateral de cada tanque para a sua base, são obtidos os tanques na forma linear da Figura 9.

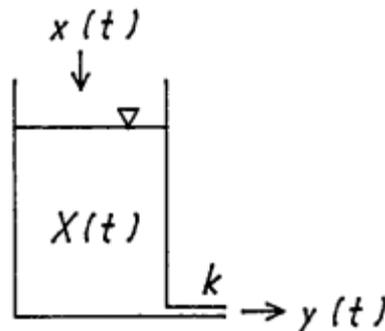
Figura 9 – Tanques na forma linear



Fonte: Sugawara (1995).

A Figura 10 apresenta um tanque linear da forma mostrada na Figura 9b, porém, considerando os valores de entrada $x(t)$, armazenamento $X(t)$, constante k e saída $y(t)$.

Figura 10 – Tanque linear com entrada, armazenamento e saída



Fonte: Sugawara (1995).

Fazendo um balanço das entradas e saídas do tanque, considerando ainda armazenamento, são obtidas as seguintes equações:

$$\frac{d}{dt} X(t) = x(t) - y(t) \quad (1)$$

$$y(t) = kX(t) \quad (2)$$

Combinando as equações (1) e (2) é obtida uma equação diferencial ordinária de primeira ordem linear (equação 3), que pode se dar em termos do armazenamento do tanque (4) ou da sua saída (5).

$$\frac{d}{dt} X(t) + kX(t) = x(t) \quad (3)$$

$$\left(\frac{d}{dt} + k \right) X(t) = x(t) \quad (4)$$

$$\left(\frac{d}{dt} + k \right) y(t) = kx(t) \quad (5)$$

Utilizando o operador diferencial $D = d/dt$, as equações são dadas por:

$$(D + k)X(t) = x(t) \quad (6)$$

$$(D + k)y(t) = kx(t) \quad (7)$$

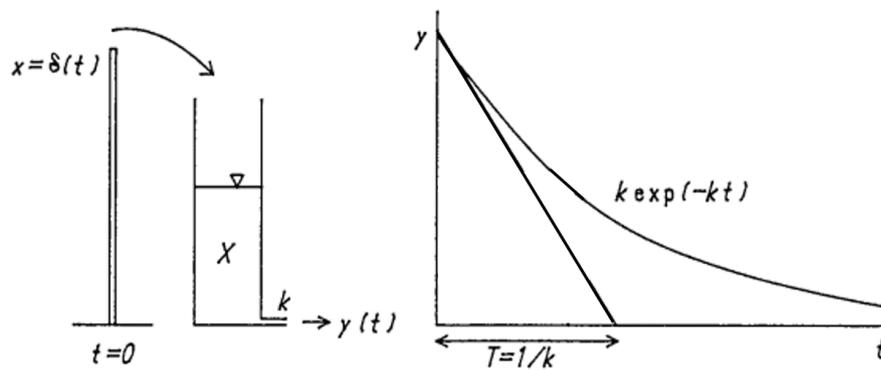
Assim, isolando as variáveis de interesse, o armazenamento e a saída do tanque são calculados por:

$$X(t) = \frac{1}{D + k} x(t) \quad (8)$$

$$y(t) = \frac{k}{D + k} x(t) \quad (9)$$

Se a entrada no tempo $t = 0$ para um tanque linear vazio é a função δ ($x = \delta(t)$), então a saída será uma função exponencial do tipo $y(t) = k \exp(-kt)$, conforme apresentado na Figura 11. A tangente para essa exponencial no tempo $t = 0$ intercepta o eixo horizontal (eixo do tempo) no tempo $T = 1/k$, que representa a constante de tempo do operador $k/(D+k)$ para um tanque linear simples.

Figura 11 – Representação gráfica da função de saída para um tanque linear vazio

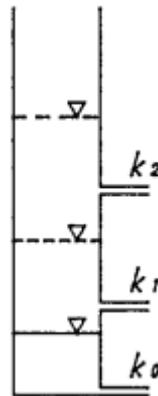


Fonte: adaptado de Sugawara (1995).

A taxa de saída decresce conforme o armazenamento decresce, como é possível observar analisando a declividade da curva exponencial. Se a saída $y(t)$ é mantida no valor inicial de $t = 0$, então o armazenamento no tanque irá desaparecer depois do tempo $T = 1/k$.

Para o tanque na forma não linear (Figura 12), quando o nível da água for menor do que a saída do meio, a descarga é controlada pelo operador linear com uma constante de tempo $T = 1/k_0$. Quando o nível da água está entre as saídas do topo e do meio, a descarga é controlada pelo operador linear com constante $1/(k_0+k_1)$ e quando o nível da água está acima da saída do topo, a constante de tempo é $1/(k_0+k_1+k_2)$.

Figura 12 – Tanque na forma não-linear



Fonte: Sugawara (1995).

Este tipo de configuração de tanque não-linear tem a propriedade de que a constante de tempo se torna menor ao passo que o armazenamento se torna maior e, teoricamente, seria uma boa representação do fenômeno de escoamento superficial.

Analisando a ordem de grandeza das constantes de tempo, tem-se que o tanque superior possui uma constante de tempo da ordem de um ou alguns dias, o segundo tanque de uma semana ou mais, o terceiro tanque de alguns meses ou mais, e o quarto tanque uma constante de tempo de anos. A constante de tempo também se torna maior na medida que a área de captação modelada fica maior.

De acordo com Sugawara (1995), a aplicação do Tank Model não se limita à utilização de quatro tanques verticais em série, como na sua concepção original. Nas análises em que o período simulado for de apenas algumas horas, o terceiro e quarto tanques podem ser desconsiderados, pois o escoamento dos reservatórios inferiores constitui uma fração desprezível da vazão total escoada. Para qualquer que seja a finalidade de aplicação do modelo, o número de reservatórios a ser utilizado depende do intervalo simulado e da discretização temporal dos dados adotada.

Sittner (1976) reforça que o Tank Model é um modelo bastante flexível e adaptável. Segundo o autor, o número de reservatórios pode ser alterado se assim necessário para melhor representar a área modelada. Assim, pode ser aplicada uma abordagem de dois até quatro tanques verticais em série e/ou uma abordagem distribuída do modelo, em que a bacia hidrográfica é dividida em um conjunto de tanques horizontais paralelos.

Conforme Okunishi, Walling e Saito (1990), apesar do Tank Model ter sido originalmente desenvolvido para pequenas bacias montanhosas do Japão, com pequenas adaptações o modelo é aplicável para outras localidades, mas sem necessidade de modificar a sua estrutura fundamental.

3.4.1. Calibração do Tank Model

O Tank Model, assim como a maioria dos modelos hidrológicos concentrados, geralmente tem seus parâmetros obtidos por meio de calibração ou estimação, e não por dados medidos em campo (HAAN, 1989). No caso do Tank Model, são calibrados os coeficientes de escoamento e de infiltração, assim como coeficientes que determinam a capacidade de armazenamento de cada reservatório do modelo.

Define-se calibração como sendo o processo de estimar os parâmetros de um modelo de forma a alcançar uma correspondência entre comportamento observado e simulado, numa tentativa explícita de associar a estrutura do modelo ao comportamento do fenômeno modelado (OLIVA, 2003).

O procedimento de estimação dos parâmetros apresenta habitualmente três fases. O processo inicia com a definição de uma função objetivo, seguida do desenvolvimento de um algoritmo de otimização e posterior aplicação a um conjunto de dados pré-selecionados. Concluída as três etapas, a calibração será considerada satisfatória se os resultados simulados pelo modelo concordarem com os valores observados e os parâmetros estiverem consistentes com as características das bacias hidrográficas (LOPES, 2005).

Existem diversas funções objetivo passíveis de aplicação para calibração de modelos, são exemplos o Erro dos Mínimos Quadrados, o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NASH; SUTCLIFFE, 1970), a Razão do Erro Médio Quadrático pelo Desvio Padrão dos Dados Observados (MORIASI et al., 2007), o Bias Percentual, entre outros.

A calibração do modelo é normalmente realizada de forma manual por tentativa e erro, num processo iterativo em que o modelador examina as diferenças entre os resultados simulados e os valores observados, tenta identificar as possíveis fontes para as diferenças, aplica ajustes aos parâmetros do modelo até que as discrepâncias sejam minimizadas a um nível

satisfatório. Nesse caso, todo o processo de calibração depende da experiência e conhecimentos do modelador (OLIVA, 2003).

Quando o número de parâmetros do modelo for muito grande o procedimento de calibração pode se tornar complexo se executado manualmente. Nesse caso, pode-se recorrer à calibração automática, que automatiza o processo de determinação dos parâmetros do modelo, além de torná-lo reproduzível e independente da pessoa que o executa.

Na literatura são encontrados diversos trabalhos que aplicaram calibração automática para otimização dos parâmetros do Tank Model utilizando diferentes métodos, entre eles o Método *Stuffed Complex Evolution* – SCE (CHEN; PI; HSIEH, 2005), Busca Aleatória Uniforme, Busca Padrão, Método de *Rosenbrock*, Evolução de Complexos Misturados (CELESTE; CHAVES, 2014), Método de Programação não-linear do Gradiente Reduzido Generalizado – GRG (SOUZA RODRIGUES PEREIRA et al., 2016), e algoritmos genéticos (CELESTE; CHAVES, 2014; SOARES JÚNIOR et al., 2009; SOUZA RODRIGUES PEREIRA et al., 2016; VASCONCELLOS, 2017).

Alguns autores atribuíam à calibração manual a vantagem de preservar a base física dos parâmetros do modelo, assim como controlar a variabilidade dos parâmetros para que não extrapolem a faixa de variação considerada adequada (SMITH et al., 2003). Entretanto, a possibilidade de controlar a variação dos parâmetros do modelo não é mais restrito à calibração manual. O algoritmo de calibração automática NSGA-II (DEB et al., 2000), por exemplo, permite ao modelador definir faixas de variação para os parâmetros do modelo a ser calibrado.

Vale salientar que a calibração automática deve ser empregada com moderação, visto que existe a possibilidade de o modelo simular os valores observados mesmo empregando fórmulas e parâmetros irrealistas. Assim, apesar do modelo reproduzir o comportamento correto do sistema estudado, o faz de maneira incorreta (OLIVA, 2003).

Para evitar inconsistências, a calibração deve fazer o conjunto de valores convergir para uma estimativa ótima ao mesmo passo que essa estimativa ótima deve estar dentro da faixa de variação aceitável dos parâmetros do modelo. Nesse sentido, a escolha do ponto de partida de cada parâmetro também pode ser fundamental para atingir esses requisitos (YAPO; GUPTA; SOROOSHIAN, 1996).

A quantidade de conjuntos de resultados ótimos para os parâmetros também depende do número de graus de liberdade do modelo. Segundo Beven (1989), qualquer modelo com suficientes graus de liberdade pode ser ajustado a um conjunto de resultados. Em alguns casos, um elevado grau de liberdade aumenta a chance de os parâmetros do modelo assumirem valores que não refletem necessariamente as características da bacia, embora a estimativa dos parâmetros ser ótima. A análise de sensibilidade do modelo pode ser uma ferramenta interessante para determinar quais parâmetros contribuem de forma mais expressiva para o resultado e em que intervalo de variação.

Sugawara (1995) sugere que a calibração automática seja usada em conjunto com as etapas de calibração manual, de modo a tornar o processo menos complexo e desgastante para o modelador, ao passo que possibilita manter o controle direto sobre a rotina de estimação dos parâmetros.

É importante destacar que mesmo tomando todas as medidas recomendadas nem sempre é possível obter o valor mais adequado para um dado parâmetro. Isto deve-se, entre outros motivos, a interdependência entre parâmetros do modelo, a indiferença da função objetivo a

valores irrealistas dos parâmetros caso não definida a faixa de variação aceitável, e/ou descontinuidades na superfície dos resultados (SOROOSHIAN; GUPTA, 1983).

Para aumentar as chances de sucesso do processo de calibração dos parâmetros do Tank Model é conveniente conhecer algumas premissas quanto à influência de cada tanque e de seus parâmetros na resposta da simulação do modelo, são elas (SUGAWARA, 1979; SURYOPUTRO et al., 2017):

- O primeiro tanque está associado com o escoamento no tempo da cheia;
- O segundo tanque está associado com o escoamento no tempo de transição da cheia para o fluxo de base (vazões mínimas);
- O terceiro e quarto tanques estão associados ao escoamento do fluxo de base.

Considerando essas premissas, o modelador deve proceder a comparação do hidrograma estimado pelo Tank Model com o observado e promover os ajustes necessários tomando as seguintes recomendações:

- Se for necessário corrigir a estimativa no tempo da cheia, os valores dos parâmetros (coeficiente de infiltração, coeficiente de escoamento da saída lateral e altura da saída) das saídas do primeiro tanque devem ser ajustados;
- Se for necessário corrigir a estimativa no tempo de mudança da cheia para o fluxo de base, os valores dos parâmetros (coeficiente de infiltração, coeficiente de escoamento da saída lateral e altura da saída) da saída do segundo tanque ou o coeficiente de infiltração do primeiro tanque devem ser ajustados;
- Se for necessário corrigir a estimativa no fluxo de base, os valores dos parâmetros (coeficiente de infiltração, coeficiente de escoamento da saída lateral e altura da saída) das saídas do terceiro tanque e/ou quarto tanque ou os coeficientes de infiltração dos tanques superiores devem ser ajustados.

A experiência acumulada de décadas de aplicação do Tank Model fornece uma base consistente de valores de referência para os parâmetros do modelo. A observação desses valores de referência pode ser útil no momento da calibração. A Tabela 2 apresenta valores de referência para os parâmetros do Tank Model aplicado para pequenas bacias (área < 5 km²) e intervalos de tempo horário e sub-horário de simulação.

Tabela 2 – Valores de referência dos parâmetros de calibração do Tank Model

Parâmetro do Tank Model		Unidade	Autores	
			Lee e Singh (2005)	Vasconcellos (2017)
Tanque 1	Coefficiente de infiltração	min ⁻¹	0,0011*	0,003200
	Coefficiente de escoamento da saída lateral superior	min ⁻¹	0,0014*	0,034693
	Coefficiente de escoamento da saída lateral intermediária	min ⁻¹	0,0014*	-
	Coefficiente de escoamento da saída lateral inferior	min ⁻¹	0,0014*	0,003229
	Altura da saída lateral superior	mm	8	49,9429
	Altura da saída lateral intermediária	mm	4	-
	Altura da saída lateral inferior	mm	1	7,796785
Tanque 2	Coefficiente de infiltração	min ⁻¹	0,00072*	-
	Coefficiente de escoamento da saída lateral	min ⁻¹	0,00072*	0,0000669
	Altura da saída lateral	mm	1	-
Tanque 3	Coefficiente de infiltração	min ⁻¹	0,00015*	-
	Coefficiente de escoamento da saída lateral	min ⁻¹	0,00015*	-
	Altura da saída lateral	mm	1	-

* Nota: valores originais em h⁻¹.

3.4.1.1. Computação evolutiva para otimização de parâmetros

No presente trabalho foi utilizado o algoritmo de otimização denominado *Elitist Nondominated Sorting Genetic Algorithm* – NSGA-II (DEB et al., 2000), uma variação do método inicialmente proposto por Srinivas e Deb (1994). Trata-se de uma aplicação de Computação Evolutiva que utiliza a técnica de algoritmo genético e busca aumentar a eficiência por meio da incorporação do conceito de elitismo.

Os métodos de Computação Evolutiva reúnem uma série de características que tornam sua aplicação para otimização dos parâmetros Tank Model promissora. Além de permitir o desenvolvimento de algoritmos capazes de encontrar soluções adequadas para problemas complexos utilizando poucas e simples linhas de código, as técnicas de Computação Evolutiva também podem ser facilmente adaptadas para problemas das mais diversas áreas (GABRIEL; DELBEM, 2008).

Os primeiros trabalhos envolvendo algoritmos evolutivos iniciaram na década de 1930 (GABRIEL; DELBEM, 2008), sendo que esse campo de estudo recebeu grandes avanços somente após a década de 1960 a partir do maior acesso a computadores (DE JONG, 2006). Desde então, a computação evolutiva vem sendo estudada em diversas frentes, uma delas é o desenvolvimento de algoritmos genéticos, uma técnica de busca utilizada na ciência da

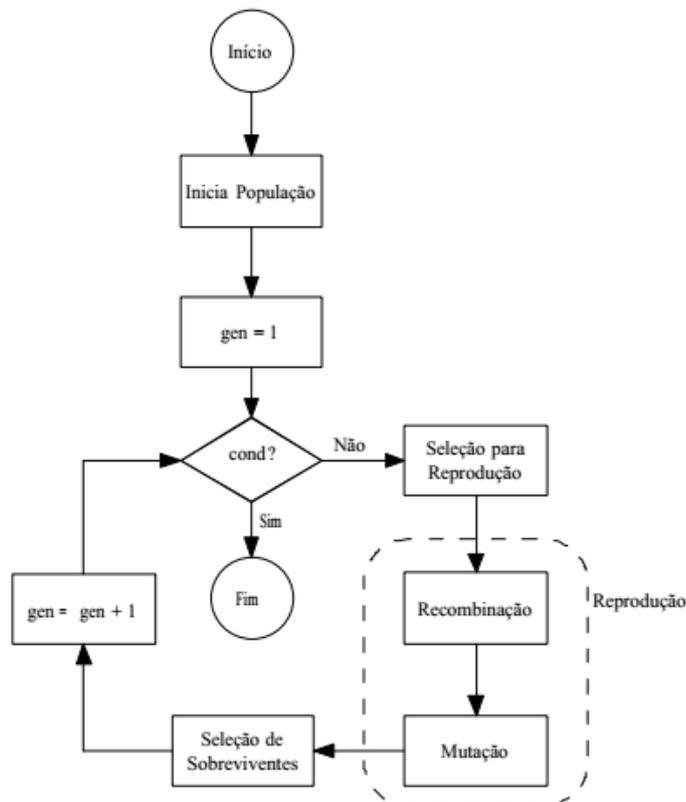
computação para achar soluções aproximadas em problemas de otimização e busca, introduzida primeiramente por Holland (1975). Os algoritmos genéticos são uma classe particular de algoritmos evolutivos que aplicam técnicas inspiradas pela biologia evolutiva como hereditariedade, mutação, seleção natural e recombinação, conforme explicado pela teoria da evolução natural biológica elaborada pelo naturalista britânico Charles Robert Darwin em meados do século XIX.

A Figura 13 apresenta a sequência lógica de um algoritmo genético típico.

O primeiro passo para aplicar um algoritmo genético típico é definir uma ou mais funções a serem otimizadas e um conjunto de soluções candidatas iniciais, que é chamada de população inicial. A população é composta por um conjunto de indivíduos e cada indivíduo representa uma única solução do problema de otimização. A função a ser otimizada é chamada função objetivo, seja o interesse a sua maximização ou minimização. No caso do algoritmo NSGA-II, a população inicial é gerada aleatoriamente e é constituída por elementos que pertencem ao domínio da função. Para executar o algoritmo também é necessário definir o número de gerações e a faixa de variação de cada parâmetro de calibração.

Após definir as entradas do algoritmo a calibração pode ser executada. A partir desse ponto os procedimentos tentam emular o processo evolutivo biológico. Para isso a população inicial de indivíduos deve sofrer pressões do meio ambiente desencadeando processos de seleção natural que privilegia as melhores soluções. Nesse processo, os indivíduos considerados melhores adaptados são aqueles que têm maiores chances de fazer parte do conjunto solução que promove uma melhor adequação das soluções objetivo (EIBEN; SMITH, 2003).

Figura 13 – Diagrama de fluxo de um algoritmo genético típico



Fonte: Gabriel e Delbem (2008).

Quando o procedimento de otimização tem mais de uma função objetivo geralmente não existe somente uma solução para o problema, mas sim um conjunto de soluções ótimas. Esse conjunto de soluções é denominado Conjunto de Pareto Ótimo ou Fronteira de Pareto (DEB, 2001).

Para avaliação e classificação de soluções na busca pela definição da Fronteira de Pareto, o NSGA-II aplica simultaneamente critérios de dominância conforme proposto por Goldberg (1989). O critério de dominância aplicado consiste na ordenação das soluções candidatas tomando como base um valor de aptidão para uma solução proporcional ao número de soluções que esta domina, ou seja, não perde em nenhum objetivo e é melhor em pelo menos um. Desse modo, as soluções com maior número de dominados possuem maior aptidão para gerar descendentes.

Além do conceito de dominância, o NSGA-II também leva em consideração a comparação da aglomeração de soluções (*crowding*), que consiste na medida da distância euclidiana entre um indivíduo e seus vizinhos no hiperespaço m -dimensional. O algoritmo NSGA-II busca encontrar a maior quantidade de soluções pertencentes à fronteira de Pareto, ao mesmo passo que prioriza soluções que garantam a diversidade da população com aplicação do operador de *crowding*. Dessa forma, as soluções com uma distância de aglomeração menor são eliminadas como forma de evitar nichos localizados.

Com base na qualidade da adequação de cada indivíduo da população, algumas das melhores soluções são selecionadas para darem origem a uma nova população com a utilização de operadores de recombinação e/ou mutação.

A recombinação é aplicada a dois ou mais indivíduos, chamados pais, e resulta em dois ou mais novos indivíduos, chamados descendentes ou filhos. Para escolher os indivíduos pais o algoritmo NSGA-II emprega seleção binária, entretanto o tipo de seleção é arbitrária e pode ser escolhido pelo modelador. Mantendo-se a configuração original do NSGA-II, a função seleciona dois indivíduos aleatoriamente e compara a aptidão de cada um entre si, sendo selecionado como pai o indivíduo com melhor aptidão. A seleção é primeiramente baseada na classificação de dominância e, se indivíduos com mesma classificação forem encontrados, a distância de aglomeração é utilizada como critério de desempate. São favoritos os indivíduos que exibem classificação mais baixa e maior distância de aglomeração.

A operação de mutação modifica aleatoriamente um ou mais parâmetros de um indivíduo do conjunto de soluções. Nesse processo, o indivíduo selecionado gera uma cópia de si mesmo, a qual pode sofrer alterações aleatórias. Tendo em vista que a operação de mutação pode gerar um indivíduo potencialmente pior do que o original, usualmente são utilizados baixos valores de probabilidade de ocorrência para essa operação.

No algoritmo NSGA-II a probabilidade padrão de ocorrer recombinação é de 90%, enquanto a probabilidade de ocorrer mutação é de apenas 10%.

Ao final dessa etapa, os novos indivíduos (descendentes) competem com os indivíduos da geração anterior, com base na qualidade da adequação, para assumir um lugar na nova população. O indivíduo tem mais chance de sobreviver se ele apresentar alguma vantagem em relação aos outros, de tal forma que esse indivíduo estará apto para transmitir suas características para os indivíduos da próxima geração (DIAS, 2016).

O processo é iterado até que uma condição seja alcançada, tal como um indivíduo que apresente uma solução que seja considerada suficientemente qualificada ou até que um número máximo de iterações predefinido seja obtido (GABRIEL; DELBEM, 2008). No caso do algoritmo NSGA-II, a rotina de otimização é finalizada apenas quando o número de gerações definido pelo usuário é atingido. Enquanto essa condição de parada não estiver satisfeita, o algoritmo dá prosseguimento à calibração.

3.4.2. Validação do Tank Model

Com o modelo estruturado e seus parâmetros calibrados, discute-se o processo de validação do Tank Model. De acordo com Beck (1987), o processo de validação consiste em determinar o comportamento do modelo para várias condições de entrada de dados fazendo a comparação das saídas do modelo com dados numéricos de observações da realidade. A validação permite confirmar que o modelo foi construído e implementado adequadamente, assim como seus parâmetros estão bem ajustados para representar de forma fiel o comportamento do sistema natural.

É importante que a comparação seja quantificável ao ponto de exprimir em um valor numérico quanto os valores simulados pelo modelo diferem dos valores observados (LOPES, 2005). Assim, para quantificar a acurácia do modelo é comum realizar a validação utilizando as mesmas métricas empregadas no processo de calibração do modelo.

3.4.3. Aplicações do Tank Model

Inicialmente o Tank Model foi desenvolvido para simular a vazão a partir da precipitação (SUGAWARA, 1995). Entretanto, em função da flexibilidade do modelo, além da sua aplicação para transformação de chuva em vazão (DEVALIYA; TIWARI; BALVANSI, 2017; SOUZA RODRIGUES PEREIRA et al., 2016), o modelo vem sendo aplicado para diversos outros fins, como estimativa das flutuações no nível de águas subterrâneas (AQILI et al., 2016), modelagem da interação entre rio e escoamento subterrâneo (NIE et al., 2017a), modelagem de escorregamentos de terra profundos, considerando infiltração e derretimento de neve (NIE et al., 2017b), manejo de águas pluviais em ambiente urbano (OU et al., 2017), análise de escoamento e infiltração (AHMAD, 2017), desenvolvimento de um índice de umidade do solo (VASCONCELLOS, 2017).

3.4.4. Tank Model para produção de sedimentos

Dentre as aplicações do Tank Model há também a utilização do modelo para estimativa da produção de sedimentos em bacias hidrográficas. A Tabela 3 apresenta a relação de pesquisas que aplicaram o Tank Model para esta finalidade.

Analisando a literatura, verifica-se que as pesquisas que propuseram estimar a produção de sedimentos com utilização do Tank Model foram desenvolvidas e aplicadas apenas para bacias hidrográficas localizadas no hemisfério norte, em áreas de clima temperado ou polar.

Tabela 3 – Relação de trabalhos que aplicaram Tank Model para estimar a produção de sedimentos

n°	Autor	Bacia Hidrográfica	Tipo de Bacia	Classe do Modelo Quanto aos Parâmetros	Número de Tanques em Série	Descrição
1	Lee e Singh (2005)	W-5 Sub-basin of Pigeon Roost Basin, Mississippi, EUA (4,04 km ²)	Agrícola	Concentrado	3	Desenvolveram um modelo conceitual de tanques (Tank Model) para estimar escoamento e produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica dado um evento de chuva. Também aplicaram o modelo IUSG proposto por Williams (1978). Em seguida, compararam os resultados obtidos a partir dos dois modelos.
2	Chikita et al. (2007)	Tanana River Basin, Alaska, EUA (66.300 km ²)	Glacial e Florestada	Semi-distribuído (bacia separada em 3 seções cada uma com um tanque glacial e 3 tanques de permafrost em série)	1 ou 3	Aplicaram a metodologia Tank Model para reproduzir o escoamento de água, concentração de sedimentos em suspensão e concentração de sílica em ambiente glacial.
3	Kido, Chikita e Hirayama (2007)	Gulkana Glacier, Alaska, EUA (31,1 km ²)	Glacial	Semi-distribuído	2	Aplicaram a metodologia Tank Model para estimar descarga de água e sedimentos em ambiente glacial.
4	Lee (2007)	W-5 Sub-basin of Pigeon Roost Basin, Mississippi, EUA (4,04 km ²)	Agrícola	Concentrado	3	Adaptou a metodologia de Lee e Singh (2005) combinando-a com filtro estatístico de Kalman para melhorar as estimativas de escoamento e produção de sedimentos.

(conclusão)

n°	Autor	Bacia Hidrográfica	Tipo de Bacia	Classe do Modelo Quanto aos Parâmetros	Número de tanques em série	Descrição
5	Wada et al. (2007)	Tanana River Basin, Alaska, EUA (66.300 km ²)	Glacial e Florestada	Semi-distribuído (bacia separada em 3 seções cada uma com um tanque glacial e 3 tanques de permafrost em série)	1 ou 3	Aplicaram a metodologia Tank Model para estimar a descarga de sedimentos em suspensão e de sílica em ambiente glacial.
6	Lee (2009)	W-5 Sub-basin of Pigeon Roost Basin, Mississippi, EUA (4,04 km ²)	Agrícola	Concentrado	3	Aplicou os modelos IUSG, IUSG associado ao filtro de Kalman, Tank Model e Tank Model associado ao filtro de Kalman para estimar escoamento e produção de sedimentos. Em seguida comparou os resultados obtidos.
7	Kang et al. (2011)	Samcheok, Coreia do Sul (392 km ²)	-	Concentrado	2	Aplicaram Tank Model para estimar a produção de sedimentos do rio Oship, na costa leste da Coreia do Sul.
8	Wada et al. (2011)	Tanana River Basin, Alaska, EUA (66.300 km ²)	Glacial e Florestada	Semi-distribuído (bacia separada em 3 seções cada uma com um tanque glacial e 3 tanques de permafrost em série)	1 ou 3	Aplicaram a metodologia Tank Model para avaliar a dinâmica do escoamento e concentração de sedimentos em suspensão em ambiente glacial.
9	Miyamoto et al. (2016)	Oikamanai River, Hokkaido, Japão (62,47 km ²)	Florestada	Concentrado	3	Aplicaram Tank Model para modelar os principais processos de transporte de íons inorgânicos em uma bacia hidrográfica florestada.

O tamanho da bacia hidrográfica não se mostrou um fator limitante da aplicação do Tank Model. Nos estudos de caso, o modelo foi testado tanto para pequenas bacias (abaixo de 5 km²) até grandes bacias (acima de 65.000 km²). Da mesma forma, bacias com diferentes coberturas de solo foram estudadas, desde áreas agrícolas até glaciais.

A maioria dos modelos que aplicaram Tank Model para estimar a produção de sedimentos adotou 3 tanques em série para representar as camadas de solo da bacia, diferentemente da concepção original do Tank Model, com 4 tanques. O modelo foi aplicado de forma concentrada para a maioria dos trabalhos, sendo a bacia hidrográfica representada como uma unidade e as variáveis e parâmetros representados por valores médios para toda a bacia. A abordagem semi-distribuída dos parâmetros foi aplicada apenas em bacias localizadas em região glacial, como forma de considerar a contribuição do derretimento do gelo na produção de sedimentos. Nenhum trabalho testou a abordagem totalmente distribuída.

Lee e Singh (2005) foram pioneiros na aplicação do Tank Model para estimativa da produção de sedimentos. Para fazer a estimativa os autores combinaram o Tank Model com a metodologia IUSG criada por Williams (1978). Os resultados encontrados demonstraram que o Tank Model é capaz de simular satisfatoriamente escoamento e produção de sedimentos, sendo que os valores estimados apresentaram boa concordância com os valores observados. Além do mais, a comparação das estimativas de produção de sedimentos geradas a partir dos modelos IUSG e Tank Model mostrou que o Tank Model fornece saídas mais acuradas.

Lee (2007) deu continuidade ao trabalho de Lee e Singh (2005), adaptando o modelo para incluir o filtro de Kalman à rotina de cálculo. Nesse trabalho, foi observado que o Tank Model e o Tank Model associado com o filtro de Kalman simulam satisfatoriamente a série temporal de concentração de sedimentos em suspensão – CSS. Entretanto, a estimativa da produção de sedimentos calculada com o Tank Model associado ao filtro de Kalman se mostrou mais acurada.

Posteriormente, Lee (2009) comparou as estimativas da produção de sedimentos geradas a partir dos modelos IUSG e Tank Model, com e sem aplicação conjunta do filtro de Kalman. Foi verificada que a estimativa da produção de sedimentos proveniente do modelo IUSG associado ao filtro de Kalman é mais acurada do que os resultados obtidos com o modelo IUSG, Tank Model e Tank Model associado com o filtro de Kalman.

As pesquisas de Chikita et al. (2007), Kido, Chikita e Hirayama (2007), Wada et al. (2007) e Wada et al. (2011), se concentraram em aplicar o Tank Model em ambiente glacial. Assim, no desenvolvimento do modelo para estimar a produção de sedimentos foi considerada a contribuição gerada pelo derretimento de gelo aplicando uma abordagem semi-distribuída. Além dos tanques em série, que representam as camadas de solo, tanques foram dispostos em paralelo para representar as áreas com e sem gelo sobre a superfície da bacia hidrográfica. Os modelos testados por esses autores apresentaram resultados satisfatórios quanto à estimativa da concentração de sedimentos.

Kang et al. (2011) aplicaram Tank Model para estimar a produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica da Coreia do Sul. Foi verificada boa concordância entre os resultados de escoamento estimados pelo Tank Model e os resultados observados. Contudo, o modelo não foi capaz de estimar de forma tão acurada a produção de sedimentos. Os resultados inconsistentes foram atribuídos à fortes chuvas causadas pela ação de um tufão sobre a área da

bacia no momento da execução do estudo. Os autores concluíram que o monitoramento de longo prazo do escoamento e sedimentos é necessário para calibrar o Tank Model, mas assim que os parâmetros estiverem ajustados, o modelo pode ser aplicado para estimar o escoamento e a produção de sedimentos em áreas com características similares e com deficiência de monitoramento.

Miyamoto et al. (2016) também encontraram resultados insatisfatórios com aplicação do Tank Model. Conforme relatam, o modelo foi capaz apenas de simular razoavelmente a série temporal de escoamento e carga de íons.

Numa visão geral dos trabalhos analisados, verifica-se indícios de que a aplicação do Tank Model para estimativa da produção de sedimentos em bacias hidrográficas é viável e que este é um campo de estudo com amplo potencial de pesquisa para melhoria das técnicas exploradas, assim como desenvolvimento de novas metodologias com diferentes abordagens daquelas já praticadas.

3.4.5. Regionalização do Tank Model

A escassez de dados em bacias não monitoradas tem sido um desafio persistente para pesquisadores da hidrologia e gestores. Por esse motivo, a aplicação de metodologias de regionalização tem sido explorada para superar essa problemática na modelagem hidrológica.

Regionalização é o termo utilizado pelos autores para designar o processo de transferir informação de uma bacia hidrográfica monitorada para bacias não monitoradas (HE; BÁRDOSSY; ZEHE, 2011). O procedimento consiste em transferir algumas informações comuns de um modelo de uma determinada bacia hidrográfica para o modelo de outra bacia localizada dentro de uma área geográfica considerada homogênea.

Dentre as pesquisas de regionalização há a aplicação de características de bacias hidrográficas para estimar parâmetros de modelos hidrológicos conceituais do tipo chuva-vazão como o Tank Model, assumindo-se que as características da bacia são determinantes para o comportamento do escoamento e de outras variáveis do ciclo hidrológico e, dessa forma, também afetam os parâmetros do modelo.

A ideia de que as características da bacia hidrográfica influenciam o comportamento do escoamento não é recente. Ainda na primeira metade do século XX, Horton (1932) destacou que um dos problemas centrais da hidrologia era entender a relação entre as características hidrológicas da drenagem na bacia hidrográfica e os fatores morfológicos, geológicos, de solo, de vegetação e climático-hidrológicos (Tabela 4).

O uso do solo é um fator importante para o comportamento do escoamento e drenagem da bacia hidrográfica (RAGHUNATH, 2006). Em certos locais, principalmente onde há atividade antrópica, a superfície da bacia pode apresentar outras formas de cobertura. Nesse sentido, o fator relacionado à vegetação descrito por Horton (1932) pode ser expandido para incluir outras categorias de uso e ocupação do solo, tais como solo exposto, edificações, entre outros.

Tabela 4 – Fatores descritivos da drenagem da bacia hidrográfica

Fator	Descrição
Morfológico	Esses fatores dependem apenas da topografia das formas terrestres que compõem a bacia e da forma e extensão do sistema de canais ou da rede de drenagem dentro dela.
Solo	Esse grupo inclui fatores descritivos dos materiais que formam a base da bacia, incluindo todas as propriedades físicas envolvidas nas relações de umidade dos solos.
Geológico-estrutural	Esses fatores relacionam-se com as profundidades e características das rochas subjacentes e com a natureza das estruturas geológicas, na medida em que estão relacionadas com as condições das águas subterrâneas ou, de outro modo, com a hidrologia da bacia de drenagem.
Vegetação	Esses fatores dependem total ou parcialmente da vegetação, natural ou cultivada, presente na bacia.
Climático-hidroológico	Os fatores climáticos incluem: temperatura, umidade, precipitação e evaporação, mas como umidade, precipitação e evaporação também podem ser consideradas como hidrológicas, os dois grupos de fatores foram combinados. Fatores hidrológicos relacionam-se especialmente com as condições em que opera o ciclo hidrológico, particularmente com o comportamento do escoamento superficial e das águas subterrâneas.

A aplicação de características da bacia para explicar o valor de parâmetros de modelos hidrológicos conceituais do tipo chuva-vazão começou a ser objeto de investigação a partir da década de 1970 (KIM; KALUARACHCHI, 2008). Nesta mesma linha, diversos pesquisadores mostraram que é possível estabelecer relações matemáticas entre os parâmetros do Tank Model e as características da bacia hidrográfica (AMIRI et al., 2016; AN et al., 2015; HUH; PARK; IM, 1993; ISHIHARA; KOBATAKE, 1979; KANG; LEE; PARK, 2013; KIM; KIM, 2004; KIM; PARK, 1986, 1988; KIM; KIM; YOON, 2000; KIM; KALUARACHCHI, 2008; LEE; KANG, 2007; YOKOO et al., 2001; YOKOO; KAZAMA, 2012).

Ishihara e Kobatake (1979) foram pioneiros na tentativa de estabelecer uma relação entre os parâmetros do Tank Model e as características da bacia hidrográfica. Os autores confrontaram os valores dos parâmetros do modelo com as características geológicas de cinco bacias localizadas no Japão. Verificou-se que as características dos estratos geológicos são determinantes para o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica, principalmente a infiltração da água, e isso se reflete nos valores dos parâmetros do Tank Model. Os autores também tentaram verificar a existência de uma relação matemática entre os parâmetros do modelo e características como área e comprimento da bacia, mas os resultados foram inconclusivos.

Yokoo et al. (2001) aplicaram o Tank Model para 12 bacias hidrográficas localizadas no Japão. Os coeficientes do modelo foram otimizados utilizando o método *Standardized Powell* (POWELL, 1964) e um total de 16 métricas foram calculadas a partir das características das bacias hidrográficas utilizando informações referentes à topografia, tipo de solo das bacias, geologia de superfície, e ao uso do solo. Por meio do procedimento de regressão linear múltipla foi possível estabelecer a relação matemática entre as características das bacias e os parâmetros do modelo.

Yokoo e Kazama (2012) revisitaram o método de regionalização proposto por Yokoo et al. (2001) e, com base em experimentos numéricos usando um modelo de escoamento distribuído, buscaram identificar relações de caráter universal para as relações regionais estabelecidas no trabalho precedente. A metodologia consistiu em aplicar um modelo chuva-vazão fisicamente distribuído para realizar uma análise de sensibilidade quanto ao efeito das características geográficas para o escoamento de uma bacia hipotética, com o objetivo de obter relações fisicamente embasadas entre esses fatores. Em seguida, foram selecionadas as relações regionais que também foram explicadas na análise de sensibilidade como potencialmente representativas do escoamento. Os autores concluíram que seis dos 12 parâmetros do Tank Model exibem potencial para serem universalizados, ou seja, aplicáveis para qualquer bacia, são eles o coeficiente de infiltração do primeiro tanque, o coeficiente de escoamento da saída lateral superior do primeiro tanque, as alturas das saídas laterais inferior e superior do primeiro tanque, o coeficiente de escoamento da saída lateral do segundo tanque e o coeficiente de escoamento da saída lateral do terceiro tanque.

Kim e Kaluarachchi (2008) conduziram um estudo da estimativa de escoamento para diferentes escalas de bacia hidrográfica utilizando Tank Model. Os dados da pesquisa foram obtidos a partir de 18 estações fluviométricas instaladas em seis sub-bacias hidrográficas localizadas na Etiópia. Os parâmetros do modelo foram otimizados utilizando o método *Large Scale Trust-Region* (MORÉ; SORENSEN, 1983). No trabalho, que difere um pouco do objetivo dos demais, o interesse dos autores foi além do estabelecimento de relações entre as características da bacia e os parâmetros do Tank Model, pois incluiu a avaliação de diferentes métodos de regionalização. Além de regressão múltipla, foram testados como método de regionalização a média global, a média por sub-bacia, a calibração regional, a calibração concentrada e a calibração por fração de volume. O estudo descobriu que a escala da bacia hidrográfica é um fator importante para a escolha do método de calibração. A calibração regional é adequada para simular o escoamento em escala local (de 100 a 10.000 km²), enquanto a calibração da fração volumétrica produziu resultados satisfatórios para escala de sub-bacia (de 14.000 a 50.000 km²). Já a calibração concentrada se mostrou o método mais adequado para simular a dinâmica de escoamento para a escala de duas ou mais sub-bacias agregadas (de 65.000 a 180.000 km²). Além disso, verificou-se que o desempenho da regionalização por regressão, transferência, média ou qualquer outro método depende da estrutura do modelo hidrológico, da disponibilidade e da qualidade das características das bacias e da especificidade hidrológica das bacias.

O estudo mais recente que propôs aplicar a regionalização dos parâmetros do Tank Model foi realizado por Amiri et al. (2016). Nesse trabalho os autores buscaram identificar se existe relação significativa entre os parâmetros do Tank Model e as métricas de paisagem referentes à taxa média de perímetro por área da feição, ao índice de forma médio da feição, ao tamanho médio de feição da paisagem e à densidade de feições da paisagem. A taxa média de perímetro por área da feição é definida como a relação entre o perímetro médio e área de uma classe particular de uso do solo na bacia hidrográfica. O índice de forma médio da feição é tido como o perímetro da feição dividido pelo perímetro mínimo possível para uma feição maximamente compactada (tamanho do pixel que representa a feição). O tamanho médio de feição da paisagem é a área média da feição para uma classe particular de uso do solo na bacia

hidrográfica. A densidade de feições da paisagem é o número de manchas de uma classe particular de cobertura do solo por unidade de área. Os parâmetros do Tank Model foram otimizados utilizando o algoritmo genético *Tank Model Optimizer Application* (SETIAWAN; FUKUDA; NAKANO, 2003; YANTO; SETIAWAN, 2003). O estudo revelou que as métricas da paisagem aplicadas podem ser relacionadas aos parâmetros otimizados do modelo. Entretanto, os resultados sugeriram que a regressão realizada não era suficiente para estimar todos os parâmetros do Tank Model. Assim, os autores concluíram que mais estudos devem ser realizados considerando outras métricas além daquelas aplicadas no estudo para especificar quais poderiam explicar melhor as variações nas respostas hidrológicas das bacias hidrográficas.

Na Coreia do Sul, existem muitos estudos sobre equações de regressão para estimar os parâmetros do Tank Model a partir das características da bacia hidrográfica (AN et al., 2015; HUH; PARK; IM, 1993; KANG; LEE; PARK, 2013; KIM; KIM, 2004; KIM; PARK, 1986, 1988; KIM; KIM; YOON, 2000; LEE, 2007).

Kim e Park (1986) buscaram estimar faixas ótimas de variação dos parâmetros do Tank Model considerando características da bacia hidrográfica como área da bacia, comprimento do rio principal, fator de forma, declividade do rio principal e uso do solo. O modelo foi aplicado para simular o escoamento diário em seis bacias de tamanho variado. Os resultados simulados foram comparados com os dados observados, sendo verificada boa concordância. Os autores concluíram que os parâmetros do Tank Model exibiam relação com o tamanho da bacia e o uso do solo.

Mais tarde, Kim e Park (1988), dando prosseguimento aos estudos com Tank Model, buscaram desenvolver um modelo hidrológico para simular o balanço hídrico diário de reservatórios de irrigação. A área de estudo incluiu 12 bacias localizadas na Coreia do Sul. Os parâmetros do modelo foram calibrados utilizando dados observados e, em seguida, relações entre os parâmetros do Tank Model e as características da bacia hidrográfica foram derivadas pela análise de regressão linear múltipla. Os resultados da simulação mostraram boa concordância com os dados observados, principalmente para condição de vazões mínimas.

O objetivo de Huh, Park e Im (1993) foi desenvolver o Tank Model para simular o escoamento diário de uma pequena bacia hidrográfica e testar a aplicabilidade do modelo para diferentes bacias. Um total de 10 bacias foram selecionadas para calibrar os parâmetros do modelo e os resultados foram relacionados com as características das bacias hidrográficas, tal como área da bacia e usos do solo. O escoamento simulado pelo modelo foi comparado com dados observados e os resultados simulados mostraram boa concordância.

Kim, Kim e Yoon (2000) testaram a regionalização do Tank Model para estimar o escoamento diário em bacias hidrográficas sem monitoramento. Foram utilizadas 26 bacias. Os parâmetros do modelo foram calibrados pelo método manual de tentativa e erro. A análise de regressão múltipla demonstrou que os parâmetros do modelo possuíam relação com as características da bacia. Os resultados da simulação mostraram boa concordância com os dados observados.

Kim e Kim (2004) aplicaram o método de otimização dos parâmetros do Tank Model utilizando dados geográficos da bacia. Os autores selecionaram seis bacias e extraíram dados geográficos como topografia, tipo de solo, uso do solo e geologia usando técnicas de

geoprocessamento. A partir dos dados geográficos foram calculadas 16 métricas. Os parâmetros do Tank Model foram otimizados utilizando os métodos *Powell* (POWELL, 1964), algoritmo genético e o *Shuffled Complex Evolution Method Developed at the University of Arizona* – SCE-UA (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992). Os parâmetros otimizados foram aqueles que apresentaram menor erro. O método de regressão linear múltipla foi aplicado para estabelecer a relação entre os parâmetros otimizados do Tank Model e as características geográficas das bacias. Os parâmetros foram otimizados usando as equações geradas a partir da regressão e o modelo foi aplicado usando esses parâmetros. A simulação funcionou satisfatoriamente para todas as bacias, sugerindo que os parâmetros do Tank Model podem ser calculados usando os resultados da pesquisa.

Lee e Kang (2007) também aplicaram regressão linear múltipla para estimar os parâmetros do Tank Model. Os autores utilizaram seis características da bacia, entre as quais área da bacia, comprimento do rio principal, fator de forma e uso do solo. Os parâmetros do Tank Model foram otimizados utilizando os métodos *Rosenbrock-Hill* (ROSENBROCK, 1960), *Complex* (DUAN, 1991) e SCE-UA (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992). A área de estudo incluiu 17 bacias, dentre estas, 15 foram utilizadas para calibração do modelo e otimização dos parâmetros. Para verificar a qualidade da regionalização, as equações de regressão foram utilizadas para calcular os parâmetros do Tank Model e simular o escoamento de duas bacias hidrográficas.

Kang, Lee e Park (2013) conduziram um estudo de regionalização do Tank Model e testaram a aplicabilidade do modelo. Para executar o trabalho, os pesquisadores utilizaram parcialmente os resultados de Huh, Park e Im (1993). O objetivo dos autores foi criar uma ferramenta capaz de simular escoamento em áreas de drenagem sem monitoramento a montante de reservatórios na Coreia do Sul. Os resultados de regionalização foram satisfatórios, levando os autores a considerarem que o Tank Model é uma ferramenta aplicável para simular escoamentos, sendo útil para planejamento, projeto e operação de reservatórios.

An et al. (2015) também conduziram um estudo de regionalização do Tank Model em bacias localizadas na Coreia do Sul, seguindo a mesma linha de pesquisa de Kang, Lee e Park (2013), porém implementaram alguns avanços em relação ao trabalho anterior. O Tank Model foi aplicado considerando três tanques e a regionalização dos parâmetros do modelo incluiu um número maior de bacias (30), tornando os resultados da regressão mais robustos. Os parâmetros do modelo foram otimizados utilizando algoritmo genético descrito por Kim, Kim e Jee (2004). Após a aplicação do modelo, os autores consideraram que as equações de regressão podem ser aplicadas para estimar os parâmetros do Tank Model para simular o escoamento em bacias sem monitoramento.

Na Tabela 5 são reunidos apenas os trabalhos que aplicaram técnicas de regionalização para estimar os parâmetros do Tank Model por meio de características da bacia hidrográfica.

Verifica-se que a maior parte dos trabalhos que abordaram a regionalização do Tank Model foi realizada na Coreia do Sul (70%). Bacias hidrográficas com diferentes escalas foram utilizadas nos estudos, com área da bacia variando de 0,47 até 176.000,00 km². O número de bacias consideradas em cada estudo também foi variado, de seis até 30 bacias, para os trabalhos mais robustos. A maioria dos estudos (90%) utilizou resolução temporal diária para os dados da simulação. Devido à flexibilidade de aplicação do Tank Model, o número de tanques

considerado em cada estudo foi variado, encontram-se trabalhos que utilizaram apenas dois tanques até trabalhos que utilizaram a concepção original do modelo com quatro tanques. A maioria (60%) aplicou três tanques em série. O método de regressão mais utilizado para regionalização dos parâmetros do Tank Model foi a regressão linear múltipla, e as métricas utilizadas foram aquelas que descrevem características relacionadas à morfologia da bacia hidrográfica, ao solo, à geologia, ao uso do solo e ao clima/hidrologia da região em que está localizada a bacia.

Conforme a Tabela 5, todos os autores aplicaram o método de regressão linear múltipla para regionalizar o Tank Model. Apesar do método de regressão linear múltipla pressupor que a relação entre a variável dependente e as variáveis independentes seja linear, autores como Kim e Park (1988), Huh; Park; Im (1993), Lee e Kang (2007), Kang, Lee e Park (2013), An et al. (2015) e Amiri et al. (2016) também consideraram como variáveis regressoras o valor logarítmico de métricas como área, comprimento do rio principal, declividade da bacia, uso do solo e tipo de solo. A consideração do valor logarítmico de métricas pode ser aplicado para reduzir o efeito da escala.

A Tabela 6 apresenta uma síntese da relação dos parâmetros do Tank Model com as características da bacia hidrográfica baseada nos resultados reportados nas pesquisas que aplicaram regressão linear para regionalizar o modelo. Na tabela, o símbolo X indica que foi identificada correlação entre o parâmetro do Tank Model e a característica da bacia hidrográfica, o símbolo de positivo (\oplus) indica que foi identificada correlação positiva e o símbolo de negativo (\ominus) indica que foi identificada correlação negativa.

Tabela 5 – Relação de trabalhos sobre regionalização dos parâmetros do Tank Model

nº	Autor	Área de Estudo	Tamanho das Bacias (km ²)	Resolução Temporal	Número de Bacias	Número de Tanques	Características Avaliadas	Método de Regionalização
1	Kim e Park (1988)	Coreia do Sul	0,47 ~ 140,50	Diário	12	3	Área da bacia hidrográfica e uso do solo.	Regressão linear múltipla
2	Huh, Park e Im (1993)	Coreia do Sul	2,75 ~ 2.060,30	Diário	10	3	Área da bacia hidrográfica, comprimento do rio principal, fator de forma e uso do solo.	Regressão linear múltipla
3	Kim, Kim e Yoon (2000)	Coreia do Sul	5,9 ~ 7.126,0	Diário	26	3	Área da bacia hidrográfica, declividade da bacia, comprimento do rio principal e uso do solo.	Regressão linear múltipla
4	Yokoo et al. (2001)	Japão	100 ~ 885	Diário	12	4	Área da bacia hidrográfica, declividade representativa da bacia, uso do solo, tipo de solo e geologia de superfície.	Regressão linear múltipla
5	Kim e Kim (2004)	Coreia do Sul	196,4 ~ 766,2	Diário	6	4	Área da bacia hidrográfica, declividade da bacia, altitude média da bacia, tipo de solo, uso do solo e formação geológica.	Regressão linear múltipla
6	Lee e Kang (2007)	Coreia do Sul	235 ~ 7.126	Diário	17	3	Área da bacia hidrográfica, fator de forma, comprimento do rio principal e uso do solo.	Regressão linear múltipla

(conclusão)

nº	Autor	Área de Estudo	Tamanho das Bacias (km ²)	Resolução Temporal	Número de Bacias	Número de Tanques	Características Avaliadas	Método de Regionalização
7	Kim e Kaluarachchi (2008)	Etiópia	111 ~ 176.000	Mensal	18	2	Área da bacia hidrográfica, profundidade do solo, uso do solo, altitude média, densidade de drenagem, declividade do rio principal, declividade da bacia, proporção entre comprimento do rio principal e comprimento da bacia, proporção entre largura da bacia e comprimento da bacia, condutividade hidráulica saturada, precipitação na estação úmida, precipitação na estação seca, precipitação média anual, evapotranspiração potencial média anual, comprimento total de canais, tipos de solo.	Média global, média por sub-bacia, regressão linear múltipla, calibração regional, calibração concentrada, calibração por fração de volume
8	Kang, Lee e Park (2013)	Coreia do Sul	2,75 ~ 2.060,30	Diário	24	3	Área da bacia hidrográfica, comprimento do rio principal e uso do solo.	Regressão linear múltipla
9	An et al. (2015)	Coreia do Sul	59,00 ~ 6.661,58	Diário	30	3	Área da bacia hidrográfica, declividade da bacia, comprimento da bacia e uso do solo.	Regressão linear múltipla
10	Amiri et al. (2016)	Alemanha	53 ~ 737	Diário	30	4	Taxa média de perímetro por área, índice de forma médio, tamanho médio de feição da paisagem, densidade de feições da paisagem e tipos de solo.	Regressão linear múltipla

Tabela 6 – Direção da correlação entre parâmetros do Tank Model e características da bacia hidrográfica

Parâmetro do Tank Model		Característica da Bacia Hidrográfica						
		Área da Bacia	Declividade Média da Bacia	Comprimento do Rio Principal	Declividade do Rio Principal	Altitude Média da Bacia	Fator de Forma	Taxa Média de Perímetro por Área de Feição
Tanque 1	Coeficiente de infiltração	$\ominus^{1,2,5,8}$	$\oplus^{5,9}$			\oplus^5		
	Coeficiente de escoamento da saída lateral superior	$\ominus^{4,5,9}$	$\oplus^5 \ominus^9$	$\ominus^{2,8}$		\oplus^5	\ominus^6	
	Coeficiente de escoamento da saída lateral inferior	$\oplus^{2,3,8} \ominus^{5,7}$	$\oplus^{3,5,9}$	\ominus^8	\oplus^7	\ominus^5		
	Altura da saída lateral superior	$\oplus^{1,5,8} \ominus^3$	$\ominus^{5,9}$	\ominus^8	\ominus^4	\oplus^5	\oplus^2	
	Altura da saída lateral inferior	$\oplus^{2,8} \ominus^{5,9}$	$\ominus^{3,5} \oplus^9$	\oplus^3		\ominus^5		
Tanque 2	Coeficiente de infiltração	$\ominus^{3,9} \oplus^5$	$\ominus^{5,7}$			\oplus^5		
	Coeficiente de escoamento da saída lateral	$\oplus^{2,8} \ominus^{3,5}$	$\oplus^{3,9} \ominus^5$			$\ominus^{5,7}$	\oplus^3	
	Altura da saída lateral	$\oplus^{2,3,8} \ominus^5$	\oplus^5	$\ominus^{2,8}$	$\ominus^4 \oplus^7$	\ominus^5		\ominus^{10}
Tanque 3	Coeficiente de infiltração	$\ominus^{1,3}$	$\oplus^3 \ominus^5$	$\ominus^2 \oplus^3$	\oplus^4	\ominus^5	\oplus^2	
	Coeficiente de escoamento da saída lateral	$\oplus^{5,6,9} \ominus^4$	$\oplus^3 \ominus^5$	$\oplus^{2,8,9}$	\ominus^4	\oplus^5	$\ominus^{3,6}$	
	Altura da saída lateral	\ominus^5	\ominus^5			\ominus^5		
Tanque 4	Coeficiente de escoamento da saída lateral	\oplus^5	\oplus^5		\oplus^4	\oplus^5		

Legenda: \oplus - identificada correlação positiva; \ominus - identificada correlação negativa; X - identificada correlação; 1 - Kim e Park (1988); 2 - Huh, Park e Im (1993); 3 - Kim, Kim e Yoon (2000); 4 - Yokoo et al. (2001); 5 - Kim e Kim (2004); 6 - Lee e Kang (2007); 7 - Kim e Kaluarachchi (2008); 8 - Kang, Lee e Park (2013); 9 - An et al. (2015); 10 - Amiri et al. (2016).

(conclusão)

Parâmetro do Tank Model		Característica da Bacia Hidrográfica						
		Índice de Forma Médio de Feição	Tamanho Médio de Feição	Densidade de Feições	Formação Geológica	Uso do Solo	Tipo de Solo	Evapotranspiração Média Anual
Tanque 1	Coefficiente de infiltração			\oplus^{10}	χ^5	$\chi^{2,4,5,6,7,8,9}$	$\chi^{4,5,10}$	
	Coefficiente de escoamento da saída lateral superior				$\chi^{4,5}$	$\chi^{1,2,3,5,6,8,9}$	$\chi^{4,5}$	
	Coefficiente de escoamento da saída lateral inferior			\ominus^{10}	$\chi^{4,5}$	$\chi^{1,3,5,6,7,9}$	$\chi^{4,5}$	
	Altura da saída lateral superior	\ominus^{10}	\oplus^{10}		χ^5	$\chi^{2,3,4,5,6,8,9}$	$\chi^{5,10}$	
	Altura da saída lateral inferior				χ^5	$\chi^{3,4,5}$	$\chi^{4,5}$	\ominus^7
Tanque 2	Coefficiente de infiltração				$\chi^{4,5}$	$\chi^{1,3,5,6}$	$\chi^{4,5}$	\ominus^7
	Coefficiente de escoamento da saída lateral			\ominus^{10}	χ^5	$\chi^{1,2,4,5,6,7,8,9}$	$\chi^{4,5,10}$	
	Altura da saída lateral	\oplus^{10}	\ominus^{10}	\ominus^{10}	χ^5	$\chi^{1,3,5,9}$	$\chi^{5,7,10}$	
Tanque 3	Coefficiente de infiltração				$\chi^{4,5}$	$\chi^{5,9}$	$\chi^{4,5}$	
	Coefficiente de escoamento da saída lateral				$\chi^{4,5}$	$\chi^{1,3,5,9}$	$\chi^{4,5}$	
	Altura da saída lateral				$\chi^{4,5}$	χ^5	$\chi^{4,5}$	
Tanque 4	Coefficiente de escoamento da saída lateral				$\chi^{4,5}$	χ^5	χ^5	

Legenda: \oplus - identificada correlação positiva; \ominus - identificada correlação negativa; χ - identificada correlação; 1 - Kim e Park (1988); 2 - Huh, Park e Im (1993); 3 - Kim, Kim e Yoon (2000); 4 - Yokoo et al. (2001); 5 - Kim e Kim (2004); 6 - Lee e Kang (2007); 7 - Kim e Kaluarachchi (2008); 8 - Kang, Lee e Park (2013); 9 - An et al. (2015); 10 - Amiri et al. (2016).

A relação de cada métrica que descreve as características da bacia hidrográfica com os parâmetros do modelo também é chamada de correlação. Em probabilidade e estatística, correlação é qualquer relação que envolva dependência entre duas variáveis (BUSSAB; MORETTIN, 2010). Para interpretar o significado físico das equações de regressão linear múltipla para regionalização do Tank Model, foram observados os sinais dos coeficientes da regressão, os quais acompanham as variáveis independentes. A correlação é considerada positiva quando o incremento do valor da variável independente (característica da bacia hidrográfica) gera um incremento na variável dependente (parâmetro do Tank Model), e negativa quando o incremento do valor da variável independente gera um decréscimo na variável dependente.

Para as características relativas à geologia, tipo de solo e uso do solo, a correlação, negativa ou positiva, depende das classificações adotadas em cada trabalho. As classes são variáveis para cada área de estudo e isto dificulta a comparação entre elas. Desta forma, para estas características apresentadas na Tabela 6 optou-se por identificar apenas a existência ou inexistência de correlação com os parâmetros do Tank Model.

Pelo número de vezes que foi identificada correlação, nota-se que as características de maior relevância para estimar os parâmetros do Tank Model a partir de características da bacia hidrográfica são a área da bacia, a declividade da bacia, a formação geológica, o tipo de solo e o uso do solo.

A Tabela 7 apresenta a qualidade do ajuste de regressão linear múltipla em termos do Coeficiente de Determinação (R^2) por autores. O R^2 é calculado pelo quadrado do Coeficiente de Correlação de Pearson (R) e varia entre 0 e 1, indicando o quanto o modelo de regressão consegue explicar os valores observados. Quanto maior o valor desse coeficiente, mais explicativo é o modelo. Conforme os resultados apresentados na tabela, verifica-se que a altura da saída lateral superior do primeiro tanque, o coeficiente de escoamento da saída lateral do segundo tanque e o coeficiente de escoamento da saída lateral do terceiro tanque são os parâmetros que demonstram os melhores valores de R^2 . Para esses parâmetros, seis ou mais autores encontraram desempenho de $R^2 > 0,5$. Nesses casos reportados, mais de 50% do parâmetro pode ser explicado pelas características da bacia hidrográfica incluídas no modelo de regressão.

A partir dos resultados e discussões da literatura é possível tirar algumas conclusões sobre a relação dos parâmetros do Tank Model e das características da bacia hidrográfica.

Amiri et al. (2016) especificaram a pesquisa para considerar apenas métricas capazes de descrever a forma da paisagem da bacia hidrográfica, além do tipo de solo. Os autores constataram que as métricas de Índice de Forma Médio de Feição, Tamanho Médio de Feição e Densidade de Feições da Paisagem, as quais descrevem o uso do solo na bacia, foram as mais relevantes para determinar os coeficientes do Tank Model.

Os demais autores empregaram métricas semelhantes entre si, o que permite fazer uma síntese dos resultados encontrados para os parâmetros do primeiro, segundo, terceiro e quarto tanque do modelo.

Tabela 7 – Qualidade do ajuste de regressão linear múltipla em termos do Coeficiente de Determinação (R^2) por parâmetro do Tank Model e por autores

Parâmetro do Tank Model		Autores									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tanque 1	Coeficiente de infiltração	0,93	0,95		0,57		0,61	0,22	0,95	0,35	0,48
	Coeficiente de escoamento da saída lateral superior	0,99	0,76	0,32	0,49		0,59		0,76	0,36	
	Coeficiente de escoamento da saída lateral inferior	0,99	0,56	0,39	0,46		0,57	0,75	0,59	0,31	0,39
	Altura da saída lateral superior	0,99	0,97	0,51	0,36		0,61		0,93	0,63	0,57
	Altura da saída lateral inferior		0,52	0,21	0,31			0,31	0,52	0,48	
Tanque 2	Coeficiente de infiltração	0,99		0,99	0,19		0,53	0,51		0,41	
	Coeficiente de escoamento da saída lateral	0,97	0,86	0,51	0,64		0,47	0,78	0,86	0,36	0,77
	Altura da saída lateral	0,47	0,73	0,36	0,12			0,56	0,73	0,42	0,85
Tanque 3	Coeficiente de infiltração	0,86	0,64	0,74	0,64					0,31	
	Coeficiente de escoamento da saída lateral	0,94	0,74	0,87	0,78		0,59		0,74	0,34	
	Altura da saída lateral				0,19						
Tanque 4	Coeficiente de escoamento da saída lateral				0,52						

Legenda: 1 - Kim e Park (1988); 2 - Huh, Park e Im (1993); 3 - Kim, Kim e Yoon (2000); 4 - Yokoo et al. (2001); 5 - Kim e Kim (2004); 6 - Lee e Kang (2007); 7 - Kim e Kaluarachchi (2008); 8 - Kang, Lee e Park (2013); 9 - An et al. (2015); 10 - Amiri et al. (2016).

Notas: os valores de Coeficiente de Determinação para Kim e Park (1988) foram calculados com base nos resultados de Coeficiente de Correlação de Pearson originalmente apresentados pelos autores; e Kim e Kim (2004) não apresentaram resultados de Coeficiente de Determinação.

Primeiro tanque

Para o coeficiente de infiltração do primeiro tanque, An et al. (2015) constataram que o coeficiente depende da declividade e do uso do solo da bacia. Entretanto, a correlação encontrada para a declividade foi, de forma contraintuitiva, positiva, indicando que quanto maior a declividade da bacia, maior a infiltração gerada pelo modelo. Presume-se que bacias menos íngremes favoreçam a infiltração da água em detrimento ao escoamento superficial, como apontado por Kim e Kaluarachchi (2008). Kim e Kim (2004) também encontraram correlação positiva com a declividade da bacia. Para Kim e Park (1988), Huh, Park e Im (1993), Kim e Kim (2004) e Kang, Lee e Park (2013), o coeficiente de infiltração do primeiro tanque depende da área da bacia, sendo a correlação negativa. A infiltração também depende de outros fatores, como o uso do solo e as características do solo da bacia. O uso do solo determina a permeabilidade da bacia e as características do solo determinam a capacidade de infiltração da água. Yokoo et al. (2001) verificaram que a baixa permeabilidade do solo foi uma característica determinante para o valor do coeficiente de infiltração.

Quanto ao coeficiente da saída lateral superior do primeiro tanque, Yokoo et al. (2001), Kim e Kim (2004) e An et al. (2015) reportaram correlação negativa com a área da bacia hidrográfica. Segundo Yokoo et al. (2001) essa influência foi mais forte para os solos da bacia que possuem baixa permeabilidade vertical, qualidade que favorece a ocorrência de escoamento superficial. Kim e Kim (2004) verificaram correlação positiva entre coeficiente da saída lateral superior do primeiro tanque e a declividade da bacia, mas An et al. (2015) encontraram correlação negativa. Ainda para o coeficiente, Huh, Park e Im (1993) e Kang, Lee e Park (2013) verificaram correlação negativa com o comprimento do rio principal.

Para o coeficiente da saída lateral inferior do primeiro tanque há resultados conflitantes relacionados à área da bacia. Huh, Park e Im (1993), Kim, Kim e Yoon (2000) e Kang, Lee e Park (2013) encontraram correlação positiva entre o coeficiente da saída lateral inferior do primeiro tanque e a área da bacia. Entretanto, Kim e Kim (2004) e Kim e Kaluarachchi (2008) encontraram correlação negativa. Além da área, Kim e Kaluarachchi (2008) verificaram que o coeficiente da saída lateral inferior do primeiro tanque foi influenciado pela porção de área florestada da bacia e a declividade do rio principal. Segundo os autores, uma bacia maior com uma porção maior de floresta produz menor escoamento superficial enquanto uma bacia mais íngreme produz maior escoamento superficial. A correlação positiva entre o coeficiente da saída lateral inferior do primeiro tanque e a declividade da bacia verificadas por Kim, Kim e Yoon (2000), Kim e Kim (2004) e An et al. (2015) reforçam a tendência observada. Os resultados reportados por An et al. (2015) demonstram que quanto maior a declividade da bacia maior o escoamento superficial, por outro lado, contraditoriamente, a presença de maior porção de floresta favoreceu maior quantidade de escoamento superficial.

Kim e Park (1988), Kim, Kim e Yoon (2000), Lee e Kang (2007), entre outros, verificaram que o uso do solo influencia o valor dos coeficientes das saídas laterais do primeiro tanque.

Para a altura do orifício lateral superior do primeiro tanque, Yokoo et al. (2001) relatam que as alturas tendem a ser maiores quando o uso do solo possui alta capacidade de armazenamento, tal como áreas ocupadas por floresta. Além disso, a capacidade de armazenamento tende a tornar-se maior quanto menor for a declividade da bacia. Em

concordância, Kim e Kim (2004) encontraram correlação negativa entre a altura da saída lateral superior do primeiro tanque e a declividade da bacia. An et al. (2015) encontraram resultados semelhantes para o coeficiente, foi verificada correlação positiva para uso do solo relativo a porção de floresta e correlação negativa para a declividade. Assim, quanto maior a porção de floresta e menor a declividade da bacia, maior a altura da saída lateral superior do primeiro tanque e maior o armazenamento. Kang, Lee e Park (2013) também verificaram que a altura da saída lateral superior possui correlação positiva com a área da bacia e com a porção de floresta. Além disso, foi verificada correlação negativa desta altura com o comprimento do rio principal. Kim e Park (1988), Kim e Kim (2004) e An et al. (2015) também verificaram correlação positiva entre a altura da saída lateral superior com a área da bacia, mas Kim, Kim e Yoon (2000) reportaram correlação negativa.

Para a altura da saída lateral inferior do primeiro tanque, Kim e Kim (2004) e An et al. (2015) relataram correlação negativa com a área da bacia. Diferentemente de Huh, Park e Im (1993) e Kang, Lee e Park (2013), que encontraram correlação positiva. Kim, Kim e Yoon (2000) verificaram correlação positiva entre a altura da saída lateral inferior e o comprimento do rio principal e correlação negativa com a declividade da bacia. Kim e Kim (2004) também verificaram correlação negativa entre a altura e a declividade da bacia, mas An et al. (2015) identificaram a correlação positiva. Kim e Kaluarachchi (2008) consideraram a evapotranspiração média anual na regressão e observaram que essa característica exerce influência sobre a altura da saída lateral inferior do primeiro tanque, sendo a correlação negativa. Isso implica que a altura da saída lateral apresenta valor mais baixo em uma região com maior evapotranspiração, pois a umidade do solo se torna deficiente mais rapidamente do que em uma região de baixa evapotranspiração.

Os resultados reportados por Kim, Kim e Yoon (2000), Yokoo et al. (2001), entre outros, indicam que o uso do solo é um fator muito relevante para a determinação das alturas das saídas laterais do primeiro tanque.

Segundo tanque

Para o coeficiente de infiltração do segundo tanque, Kim e Park (1988), Kim, Kim e Yoon (2000), Kim e Kim (2004) e Lee e Kang (2007) verificaram que o uso do solo foi uma característica determinante. Kim e Kim (2004) reportaram correlação positiva com a área da bacia. Entretanto, Kim, Kim e Yoon (2000) e An et al. (2015) encontraram correlação negativa com a área da bacia. Kim e Kim (2004) obtiveram correlação negativa com a declividade da bacia, assim como Kim e Kaluarachchi (2008). Além disso, Kim e Kaluarachchi (2008) encontraram correlação negativa com a evapotranspiração média anual. Conforme os resultados reportados, uma bacia maior com maior declividade e maior evapotranspiração gera menor infiltração. Ainda para os autores, esperava-se que a área da bacia mostrasse correlação positiva com o coeficiente de infiltração do segundo tanque, visto que os resultados para os parâmetros do primeiro tanque demonstraram que bacias com área maior produzem menor escoamento superficial, sendo compensado por uma maior infiltração. A formação geológica e o tipo de solo, por estarem associados à capacidade de escoamento subsuperficial, também podem influenciar o valor do coeficiente de infiltração do segundo tanque, como verificado por Yokoo et al. (2001) e Kim e Kim (2004).

Kim, Kim e Yoon (2000) e Kim e Kim (2004) reportaram que o coeficiente da saída lateral do segundo tanque possui correlação negativa com a área da bacia. Já Huh, Park e Im (1993) e Kang, Lee e Park (2013) encontraram correlação positiva com a área da bacia. Para Yokoo et al. (2001), o coeficiente foi influenciado principalmente pelo tipo de solo e uso do solo. Segundo os autores, se as características dos solos são desfavoráveis à infiltração da água, o escoamento subsuperficial na direção horizontal tende a ser maior. Para An et al. (2015) a regressão apontou que o coeficiente da saída lateral do segundo tanque está relacionado com a declividade da bacia. A correlação encontrada foi positiva, indicando que bacias com maior declividade possuem geram maior escoamento horizontal. Kim, Kim e Yoon (2000) encontraram a mesma tendência quanto à declividade da bacia. Contudo, Kim e Kim (2004) obtiveram correlação negativa com a declividade da bacia. An et al. (2015) verificaram ainda que o uso do solo foi uma característica determinante para o valor do coeficiente, sendo que maior porção de floresta gera maior escoamento subsuperficial proveniente do segundo tanque. Kim e Park (1988), Lee e Kang (2007), entre outros, também observaram que o uso do solo foi um fator determinante para o coeficiente. Kim e Kaluarachchi (2008) verificaram que o coeficiente de saída lateral do segundo tanque possui correlação positiva com a porção de floresta, em contradição ao coeficiente da saída lateral do primeiro tanque, que mostrou correlação negativa. Esses resultados indicam que maior porção de floresta gera menor escoamento superficial e maior escoamento subsuperficial na simulação do modelo. Os autores consideraram que a correlação positiva do coeficiente de infiltração do primeiro tanque com a porção de floresta obtida por meio da análise de regressão está em concordância com o valor do coeficiente da saída lateral do segundo tanque. Os resultados encontrados indicaram que áreas ocupadas por florestas possuem maior capacidade de infiltrar a água para uma zona mais baixa. Ainda segundo Kim e Kaluarachchi (2008), a contribuição negativa da altitude média sugere que bacias em menores elevações produzem maior escoamento subsuperficial do que bacias mais elevadas. Kim e Kim (2004) também reportaram correlação negativa com a altitude da bacia, reforçando o resultado de Kim e Kaluarachchi (2008).

Quanto à altura da saída lateral do segundo tanque, Kang, Lee e Park (2013) descrevem que esse parâmetro, o qual está relacionado com a capacidade de armazenamento no tanque, foi influenciado pela área da bacia e comprimento do rio principal, sendo a correlação positiva para a área e negativa para o comprimento do rio principal. A relação indica que quanto maior a área e menor o comprimento do rio principal, maior a altura da saída lateral. Huh, Park e Im (1993) e Kim, Kim e Yoon (2000) também encontraram correlação positiva com a área da bacia, mas Kim e Kim (2004) verificaram correlação negativa. Huh, Park e Im (1993) também obtiveram correlação negativa entre a altura e o comprimento do rio principal, reforçando o resultado. Para Kim e Kaluarachchi (2008) a altura da saída lateral do segundo tanque possui correlação positiva com a declividade do rio principal, enquanto Yokoo et al. (2001) reportaram correlação negativa. Kim e Kim (2004) encontraram correlação positiva com a declividade da bacia. Ainda para Kim e Kaluarachchi (2008), a altura da saída lateral do segundo tanque mostrou correlação positiva com a porção de solo cuja drenagem é pobre. A baixa capacidade de drenagem do solo dificulta a infiltração e o escoamento subsuperficial na direção horizontal através das camadas de solo. Portanto, quanto maior a porção de solo pobre em drenagem na bacia hidrográfica, maior a altura da saída lateral do segundo tanque. Para An et al. (2015), que consideraram na

regressão as características de área, declividade e uso do solo, a altura da saída lateral do segundo tanque mostrou ser dependente apenas do uso do solo da bacia. Para Kim e Park (1988), Kim, Kim e Yoon (2000) e Kim e Kim (2004) o coeficiente também mostrou ser dependente do uso do solo.

Terceiro tanque

Conforme Kim e Park (1988) e Kim, Kim e Yoon (2000), o coeficiente de infiltração possui correlação negativa com a área da bacia. Kim e Kim (2004) encontraram correlação negativa com a declividade da bacia. Entretanto, Kim, Kim e Yoon (2000) verificaram correlação positiva com a declividade da bacia, estando em concordância com o resultado de correlação positiva entre o coeficiente e a declividade do rio principal reportado por Yokoo et al. (2001). Huh, Park e Im (1993) encontraram correlação negativa entre o coeficiente de infiltração e o comprimento do rio principal, enquanto Kim, Kim e Yoon (2000) obtiveram correlação positiva. Yokoo et al. (2001) verificaram que o coeficiente também é influenciado pelas características de formação geológica e tipo de solo. O coeficiente tende a ser maior para solos e formações geológicas cujas características permitem alta permeabilidade vertical. Contudo, se a permeabilidade vertical for alta, o escoamento subsuperficial na direção horizontal tende a ser desfavorecido. Para An et al. (2015) o coeficiente de infiltração do terceiro tanque depende uso do solo, exibindo correlação positiva com a porção de floresta. Isto significa que áreas ocupadas por florestas permitem maior infiltração da água através das camadas de solo mais profundas. Kim e Kim (2004) também verificaram que o uso do solo é um fator importante para explicar a infiltração do terceiro tanque.

Quanto ao coeficiente de escoamento horizontal do terceiro tanque, Kim, Kim e Yoon (2000) relataram correlação positiva entre o coeficiente e a declividade da bacia, indicando que quanto maior a declividade maior o escoamento proveniente do terceiro tanque. Por outro lado, Kim e Kim (2004) identificaram correlação negativa com a declividade da bacia. As características referentes à área da bacia, comprimento do rio principal e fator de forma. Lee e Kang (2007), Kim e Kim (2004) e An et al. (2015) encontraram correlação positiva entre coeficiente de escoamento horizontal do terceiro tanque e a área da bacia. Diferentemente, Yokoo et al. (2001) encontraram correlação negativa com a área da bacia. Kim, Kim e Yoon (2000) e Lee e Kang (2007) verificaram correlação negativa com o fator de forma. Huh, Park e Im (1993), Kang, Lee e Park (2013) e An et al. (2015) identificaram correlação positiva com o comprimento do rio principal. An et al. (2015) reportaram que o uso do solo pode ser determinante para o escoamento subsuperficial proveniente do terceiro tanque. Kim e Park (1988), Kim, Kim e Yoon (2000) e Kim e Kim (2004) também verificaram que o uso do solo foi um fator importante.

Kim e Kim (2004) relataram que a altura da saída lateral do terceiro tanque possui correlação negativa com a área, a declividade e a altitude média da bacia. Os autores também verificaram que o coeficiente foi influenciado pelo uso do solo, geologia e tipo de solo. Os resultados apresentados por Yokoo et al. (2001) reforçam que a formação geológica e o tipo de solo podem influenciar esse parâmetro.

Quarto tanque

Quanto ao coeficiente da saída lateral do quarto tanque, Kim e Kim (2004) encontraram correlação positiva com a área da bacia e com a declividade da bacia. Yokoo et al. (2001) verificaram correlação positiva com a declividade do rio principal e com a porção da bacia cuja formação geológica promove baixa permeabilidade vertical. Além disso, foi encontrada correlação negativa com a porção da bacia cuja formação geológica promove alta permeabilidade vertical. Segundo os autores, áreas da bacia com alta permeabilidade vertical propiciam a retenção de água subterrânea enquanto descarregam lentamente a água na direção horizontal do fluxo de base. Kim e Kim (2004) também encontraram resultados apontando que o coeficiente pode ser explicado pelas características de formação geológica, tipo de solo e uso do solo.

Considerações gerais

Nota-se algumas contradições entre resultados da regressão para diferentes trabalhos. Para uma determinada característica ou métrica foi encontrada correlação positiva enquanto para outra foi encontrada correlação negativa, ou vice-versa. A ocorrência de falha na definição dos valores otimizados dos parâmetros do Tank Model é a principal hipótese levantada para explicar os resultados conflitantes entre os autores consultados. Como já mencionado, Sorooshian e Gupta (1983) apontam que fatores como interdependência entre parâmetros do modelo, valores irrealistas dos parâmetros, entre outros motivos, podem afetar o desempenho da calibração. Nesse sentido, a escolha do método de calibração e a definição de faixas adequadas de variação dos parâmetros podem ser fundamentais para a definição dos valores mais adequados dos parâmetros do Tank Model. Os autores que aplicaram técnicas de regionalização do Tank Model utilizaram diferentes métodos de otimização dos parâmetros do modelo, tal como o método de calibração manual por tentativa e erro, o método Powell (POWELL, 1964), o método de algoritmo genético, entre outros. Diferentes métodos de calibração podem levar a diferentes valores otimizados do modelo, afetando posteriormente o resultado de regionalização. Além disso, a baixa qualidade dos dados observados também pode prejudicar a calibração de modelos hidrológicos (YAPO; GUPTA; SOROOSHIAN, 1996). Verifica-se também diferenças na abordagem de aplicação do Tank Model entre autores quanto à quantidade de tanques utilizada para a simulação. O número de tanques pode influenciar os parâmetros do modelo e, por consequência, interferir nos resultados da regionalização. Outra hipótese que pode ser levantada para explicar os resultados conflitantes está relacionada à análise de regressão. A qualidade dos dados e a forma de cálculo das métricas que descrevem as características da bacia hidrográfica podem influenciar o resultado da regressão linear múltipla. Como apontado, alguns autores consideraram as variáveis regressoras em termos do valor logarítmico das características das bacias. Além do mais, a existência de correlação entre as próprias variáveis independentes do modelo de regressão pode levar a resultados distintos devido aos efeitos de mediação ou confusão (MACKINNON; KRULL; LOCKWOOD, 2000).

A mediação ou confusão pode ocorrer após a inserção de uma terceira variável na equação que relaciona uma variável dependente a uma variável independente. A mediação ocorre quando a relação entre uma variável independente e uma variável dependente assume dois caminhos causais. Um dos caminhos vincula a variável independente à variável dependente

diretamente (o efeito direto) e a outra vincula a variável independente à variável dependente por meio de um mediador (o efeito indireto). Um efeito indireto implica que a variável independente causa o mediador, que, por sua vez, causa a variável dependente. A confusão é causada pela presença de uma variável de confusão, também chamada de fator de confusão. A variável de confusão influencia tanto a variável dependente, quanto a variável independente, causando uma relação considerada espúria. O fator de confusão obscurece falsamente ou acentua a relação entre a variável dependente e a variável independente. Diferentemente da mediação, no efeito de confusão não há necessariamente uma relação causal entre as variáveis (MACKINNON; KRULL; LOCKWOOD, 2000). O efeito de confusão pode inclusive modificar o sinal do coeficiente de regressão associado à variável independente, alterando a interpretação física da relação da característica da bacia hidrográfica com o parâmetro do Tank Model.

Tendo em vista que a análise de regressão possibilita encontrar uma relação razoável entre variáveis por meio de relações empíricas, o resultado será tão mais robusto quanto maior for o número de bacias hidrográficas consideradas no estudo, desde que haja variabilidade de características.

Apesar disso, as conclusões mais relevantes são que características como área e uso do solo são muito importantes para a determinação dos parâmetros otimizados do Tank Model. Quanto ao uso do solo, a porção de floresta é a classe mais presente e relevante para os resultados da regressão reportados nos trabalhos. Outras características também são importantes para explicar parâmetros específicos do modelo. A declividade da bacia, por exemplo, exerce uma forte influência no armazenamento e escoamento superficial do primeiro tanque (alturas e coeficientes das saídas laterais do tanque), assim como influencia o escoamento subsuperficial do segundo tanque (coeficiente da saída lateral do tanque). O comprimento do rio principal é importante para determinar os parâmetros do terceiro tanque, principalmente o parâmetro que controla o escoamento subsuperficial (coeficiente da saída lateral do tanque). O tipo de solo afeta fortemente a infiltração do primeiro tanque e também influencia os parâmetros do segundo tanque associados com o escoamento subsuperficial (altura e coeficiente da saída lateral do tanque).

A literatura demonstra evidências contundentes de que os parâmetros do Tank Model podem ser estimados por medidas das características das bacias hidrográficas. Constata-se que as pesquisas estudaram apenas a abordagem hidrológica chuva-vazão do Tank Model, sendo que nenhum trabalho testou a regionalização para outras aplicações, tal como produção de sedimentos.

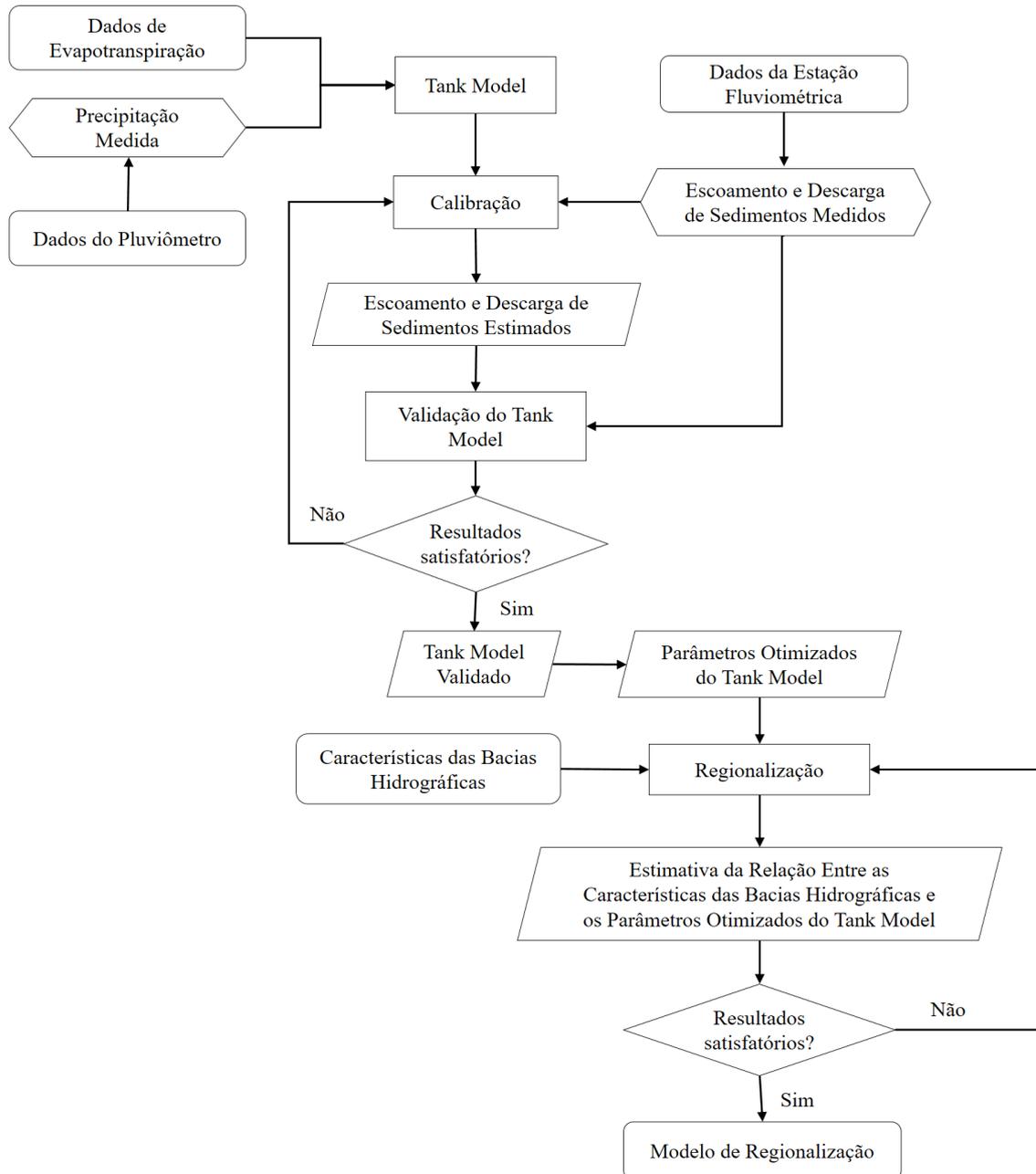
Dado o número relativamente reduzido de pesquisas nessa área, novos trabalhos podem trazer contribuições expressivas para o avanço da aplicação do Tank Model como uma ferramenta de estudo da hidrologia/hidrossedimentologia. Além disso, a regionalização tem grande potencial de aplicação para bacias com deficiência de monitoramento hidrológico, para as quais os parâmetros do Tank Model não podem ser calibrados utilizando os métodos convencionais devido à falta de dados observados de vazão e descarga de sedimentos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Metodologia

Para alcançar os objetivos propostos a metodologia do trabalho foi estruturada conforme o fluxograma da Figura 22.

Figura 14 – Fluxograma metodológico



A metodologia consiste em uma série de etapas. O primeiro passo foi adaptar o Tank Model para fornecer estimativas de escoamento e de descarga de sedimentos. Em seguida, o modelo foi aplicado para a área de estudo. Os dados de entrada necessários para rodar o modelo

foram os valores de precipitação e evapotranspiração. Os dados de precipitação foram provenientes de medição em pluviômetros, enquanto os dados de evapotranspiração foram estimados com base na literatura.

Para que o Tank Model pudesse fornecer estimativas satisfatórias de descarga de sedimentos, os parâmetros do modelo precisaram ser ajustados através do procedimento de calibração. Após a calibração veio a etapa de validação, onde foi feita a avaliação da capacidade de estimativa do Tank Model. Para a calibração do modelo e posterior validação foram utilizados dados observados medidos em estações fluviométricas. Enquanto os resultados estimados pelo modelo foram insatisfatórios o processo foi mantido aplicando-se modificações na estratégia de calibração, tal como o ajuste da faixa de variação dos parâmetros do modelo. Quando os resultados da calibração e validação refletiram níveis satisfatórios foi dado prosseguimento às etapas seguintes da metodologia.

Adicionalmente, foi testada a regionalização do Tank Model modificado para estimativa do escoamento e produção de sedimentos. Os parâmetros otimizados obtidos após o procedimento de calibração, por sua vez, foram utilizados como dados de entrada para o modelo de regionalização. Além disso, nesse procedimento também foram utilizadas informações sobre as características das bacias hidrográficas. Quando necessário, modificações no método de regionalização foram aplicadas para alcançar resultados satisfatórios.

A seguir cada etapa da metodologia é abordada em maiores detalhes.

4.2. Tank Model Modificado

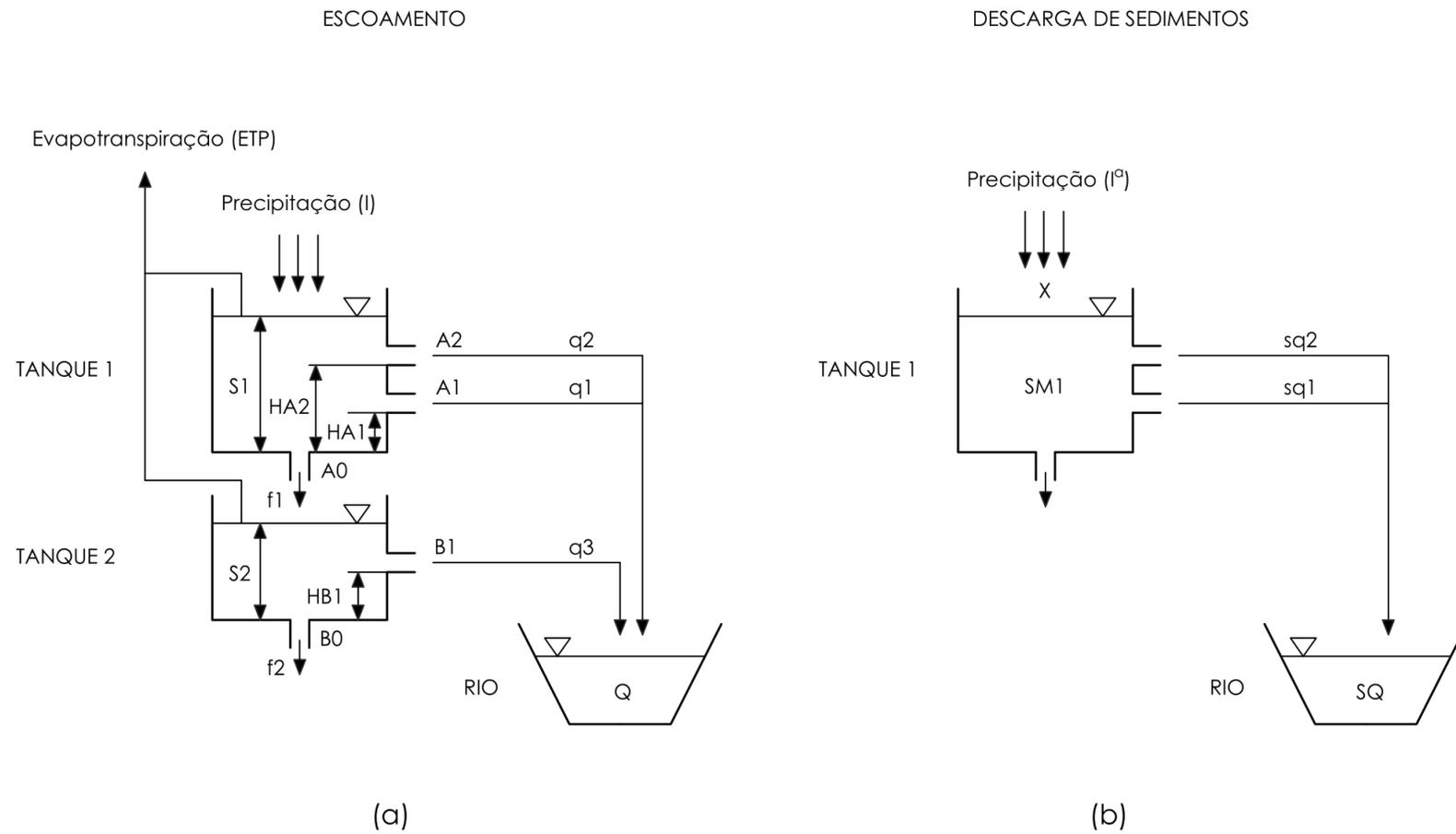
O Tank Model utilizado no presente trabalho, voltado a uma abordagem hidrossedimentológica, foi reestruturado para dois tanques dispostos verticalmente em série conforme esquema da Figura 15. A estrutura de dois tanques foi adotada porque a simulação aplicada foi baseada em eventos e o período simulado foi de algumas horas ou dias de duração para cada evento hidrossedimentológico. Nesse caso, ponderou-se que a contribuição de um terceiro e quarto tanques para o escoamento total da bacia hidrográfica seria insignificante.

Para a aplicação hidrossedimentológica proposta, os fluxos do modelo não representam apenas o escoamento de água, mas também o escoamento de água contendo sedimentos em suspensão. Assim, o Tank Model fornece duas saídas, escoamento e descarga de sedimentos. Apesar da estrutura do modelo ser semelhante à aplicação hidrológica do tipo chuva-vazão, a interpretação do seu funcionamento é diferenciada por esse aspecto.

A água é proveniente da entrada da precipitação na forma de chuva e os sedimentos são provenientes da erosão do solo da bacia. A chuva é inserida no modelo com unidade de comprimento, assim como a evapotranspiração é subtraída em termos de comprimento, ambos em milímetros. No esquema conceitual adotado, considera-se que ao atravessar o primeiro tanque a água interage com os sedimentos disponíveis na superfície da bacia, incorporando-os. Assim, os escoamentos nos tanques também podem ser interpretados em termos de fluxo de sedimentos.

O primeiro tanque representa a superfície da bacia hidrográfica, enquanto o segundo tanque representa o ambiente subsuperficial.

Figura 15 – Representação esquemática do Tank Model indicando seus parâmetros e componentes de escoamento e de transferência de sedimentos



Do ponto de vista do escoamento de água (Figura 15a), o armazenamento no primeiro tanque é atribuído à precipitação e às saídas, representadas pela evapotranspiração, pela infiltração para o segundo tanque e pelos escoamentos laterais. No esquema adotado são utilizadas duas saídas laterais para representar o escoamento superficial do primeiro tanque.

O armazenamento do segundo tanque é atribuído à infiltração proveniente do primeiro tanque e às saídas são representadas pela infiltração e pelo fluxo lateral de escoamento.

O balanço de volume de armazenamento de água em cada tanque é descrito matematicamente por meio das equações:

$$\frac{dS1}{dt} = I - ETP - q1 - q2 - f1 \quad (10)$$

$$\frac{dS2}{dt} = f1 - q3 - f2 \quad (11)$$

onde $S1$ representa a altura de armazenamento de água do primeiro tanque (mm); $S2$ é a altura de armazenamento de água do segundo tanque (mm); I é a intensidade de precipitação ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$); ETP é a evapotranspiração ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$); $q1$ e $q2$ são os escoamentos laterais do primeiro tanque ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$); $q3$ representa o escoamento lateral do segundo tanque ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$); $f1$ representa a infiltração do primeiro tanque para o segundo tanque ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$); $f2$ representa a infiltração do segundo tanque ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$).

Caso o armazenamento do primeiro tanque seja nulo, isto é, na condição em que o tanque se encontra vazio, a evapotranspiração é subtraída do segundo tanque. Se ambos os tanques estiverem vazios a evapotranspiração é considerada nula.

A taxa de escoamento através das saídas laterais de cada tanque é linearmente proporcional à altura de água armazenada no tanque, assim os escoamentos laterais são expressos pelo seguinte conjunto de equações:

$$q1 = A1 \cdot (S1 - HA1) \quad (12)$$

$$q2 = A2 \cdot (S1 - HA2) \quad (13)$$

$$q3 = B1 \cdot (S2 - HB1) \quad (14)$$

onde $A1$ e $A2$ são os coeficientes das saídas laterais inferior e superior do primeiro tanque (min^{-1}), respectivamente; $B1$ é o coeficiente da saída lateral do segundo tanque (min^{-1}); $HA1$ e $HA2$ são as alturas das saídas laterais inferior e superior do primeiro tanque (mm), respectivamente; $HB1$ é a altura da saída lateral do segundo tanque (mm).

Da mesma forma que os escoamentos laterais, a infiltração também é linearmente proporcional à altura de água armazenada no tanque. Assim, a infiltração em cada tanque do modelo é descrita por:

$$f1 = A0 \cdot S1 \quad (15)$$

$$f2 = B0 \cdot S2 \quad (16)$$

onde $A0$ é o coeficiente de infiltração do primeiro tanque (min^{-1}); $B0$ é o coeficiente de infiltração do segundo tanque (min^{-1}).

O escoamento total estimado é obtido por meio da soma dos escoamentos de cada tanque, conforme a equação:

$$Q = q1 + q2 + q3 \quad (17)$$

onde Q é a escoamento total ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$).

Multiplicado o escoamento simulado ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) pela área da bacia (km^2) e fazendo as devidas conversões de unidades, obtém-se o escoamento em termos de volume ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

Do ponto de vista da descarga de sedimentos (Figura 15b), para o primeiro tanque a entrada de sedimentos é linearmente proporcional à intensidade da precipitação e à concentração de sedimentos sobre a superfície da bacia. As saídas são representadas pela transferência de sedimentos através da base e pelas descargas de sedimentos da lateral do tanque.

A variação da quantidade de sedimentos do primeiro tanque é dada por:

$$\frac{dSM1}{dt} = I^a \cdot X - sq1 - sq2 - sf1 \quad (18)$$

onde $SM1$ é a massa de sedimentos do primeiro tanque (ton); X é a concentração de sedimentos sobre a superfície da bacia hidrográfica ($\text{ton} \cdot \text{mm}^{-a}$); a é a potência de I ; $sq1$ e $sq2$ são as descargas de sedimentos das saídas laterais do primeiro tanque ($\text{ton} \cdot \text{min}^{-1}$); $sf1$ representa a transferência de sedimentos do primeiro tanque ($\text{ton} \cdot \text{min}^{-1}$).

Williams (1978) propôs a ideia de Sedimentograma Unitário e baseando-se nos pressupostos do hidrograma unitário, assumiu que a entrada de sedimentos na modelagem varia linearmente com a precipitação. No presente trabalho, além da relação linear ($a = 1$), também foram testadas relações não-lineares para a componente que descreve a entrada de sedimentos do Tank Model modificado ($I \cdot X^a$), aplicando-se potências inteiras ($a = 2$, $a = 3$, $a = 4$ ou $a = 5$).

As descargas de sedimentos na lateral do primeiro tanque são linearmente proporcionais ao escoamento e à concentração de sedimentos no tanque, sendo calculadas por:

$$sq1 = q1 \cdot \frac{SM1}{S1} \quad (19)$$

$$sq2 = q2 \cdot \frac{SM1}{S1} \quad (20)$$

A transferência de sedimentos também é linearmente proporcional à concentração de sedimentos, além de depender da infiltração na base do tanque:

$$sf1 = f1 \cdot \frac{SM1}{S1} \quad (21)$$

A descarga de sedimentos estimada é obtida por meio da soma das componentes de descarga de sedimentos, conforme a equação:

$$SQ = sq1 + sq2 \quad (22)$$

onde, SQ é a descarga de sedimentos total ($\text{ton} \cdot \text{min}^{-1}$).

Os procedimentos de cálculo descritos nesta seção foram implementados em linguagem MATLAB utilizando o software MATLAB® R2012b. O algoritmo do Tank Model elaborado para calcular o escoamento é apresentado no APÊNDICE L e o algoritmo para descarga de sedimentos é apresentado no APÊNDICE M.

4.3. Área de estudo

Considerando a disponibilidade de dados, a área de estudo compreendeu um conjunto de quatro bacias hidrográficas, todas localizadas dentro dos limites do estado de Santa Catarina, como pode ser observado na Figura 16. A identificação das bacias é feita na Tabela 8.

Figura 16 – Localização das estações fluviométricas

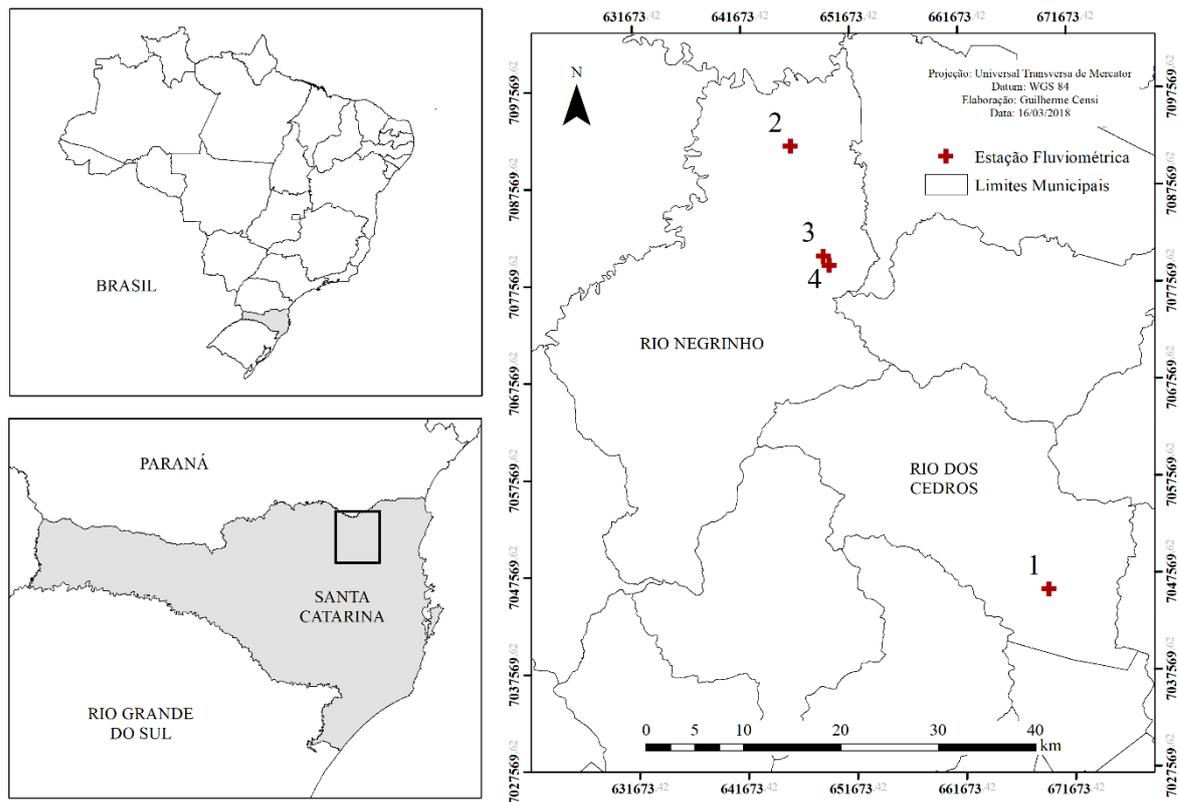


Tabela 8 – Estações fluviométricas

No.	Estação Fluvial	Intervalo de Aquisição de Dados (min)	Área de Drenagem (km ²)	Disponibilidade de Dados	
				Início	Fim
1	Rio Cunha	10	16,72	18/01/2012	09/07/2013
2	Rio dos Bugres RB01	10	64,41	16/12/2011	05/11/2012
3	Rio dos Bugres RB10	10	11,45	16/12/2011	23/10/2012
4	Rio dos Bugres RB11	10	6,95	16/12/2011	23/10/2012

- Monitoramento na bacia do Rio Cunha;

A Bacia Hidrográfica do Rio Cunha foi monitorada no período compreendido entre 18 de janeiro de 2012 e 09 de julho de 2013, totalizando 1 ano, 5 meses e 20 dias de monitoramento. Dados de nível do rio para o exutório da bacia foram medidos por um sensor GE - Druck PTX 1030 acoplado a um *Data Logger Waterlog* modelo H500XL. A medição de vazão para elaboração da curva-chave da estação, utilizada para transformar os dados de nível em vazão, foi efetuada com o emprego de medidor de vazão *FlowTracker*. Também foram coletados dados de turbidez com uso de um sensor da marca FTS modelo DTS-12, cuja faixa de leitura é de 0 a 1.600 Unidades Nefelométricas de Turbidez. Os dados de turbidez, por sua vez, foram utilizados como medida indireta para calcular a concentração de sedimentos em suspensão – CSS a partir da confecção da curva-chave que relaciona turbidez e CSS do rio. Para estabelecer esta relação foram coletadas amostras em diferentes intervalos de turbidez. As coletas foram realizadas com o amostrador de sedimentos DH-48, sendo o método de amostragem em campo o de Igual Incremento de Largura – IIL, com amostragem por integração na vertical (GOERL, 2014).

- Monitoramento nas bacias do Rio dos Bugres.

O período de monitoramento das estações localizadas na Bacia Hidrográfica do Rio dos Bugres teve início em 16 de dezembro de 2011. Para a bacia RB01 o monitoramento cessou em 05 de novembro de 2012, totalizando 10 meses e 20 dias de monitoramento. Para as bacias RB10 e RB11 o monitoramento cessou em 23 de outubro de 2012, totalizando 10 meses e 12 dias de monitoramento. Dados de nível d'água foram coletados utilizando-se um sensor de nível/pressão modelo H-3121 na bacia RB01 e sensores modelo PTX 1030 nas sub-bacias RB10 e RB11. Para armazenar os dados foi utilizado um registrador eletrônico *Data Logger* modelo H-500XL. O monitoramento da turbidez foi realizado através do sensor digital de turbidez modelo DTS-12, cuja faixa de medição é de 0 a 1.600 Unidades Nefelométrica de Turbidez (CARDOSO, 2013).

Destaca-se que as séries de dados das bacias do Rio dos Bugres não são completas devido à ocorrência de alguns problemas durante o período de monitoramento. Na bacia RB01 ocorreu incrustação no leitor do sensor de turbidez. O problema foi solucionado apenas no dia 30 de março de 2012. Nas bacias RB10 e RB11, devido à baixa incidência de luz, a alimentação de energia fornecida pelos painéis solares ficou comprometida durante o Inverno. A estação fluviométrica da bacia RB10 ficou sem armazenar dados durante 18 dias, de 29 de junho de

2012 a 17 de julho de 2012, enquanto a estação da bacia RB11 ficou sem armazenar dados durante sete dias, de 09 de julho de 2012 a 16 de julho de 2012.

Maiores detalhes sobre o monitoramento nas bacias do Rio dos Bugres podem ser encontrados no trabalho de Cardoso (2013).

4.3.1. Bacia Hidrográfica do Rio Cunha

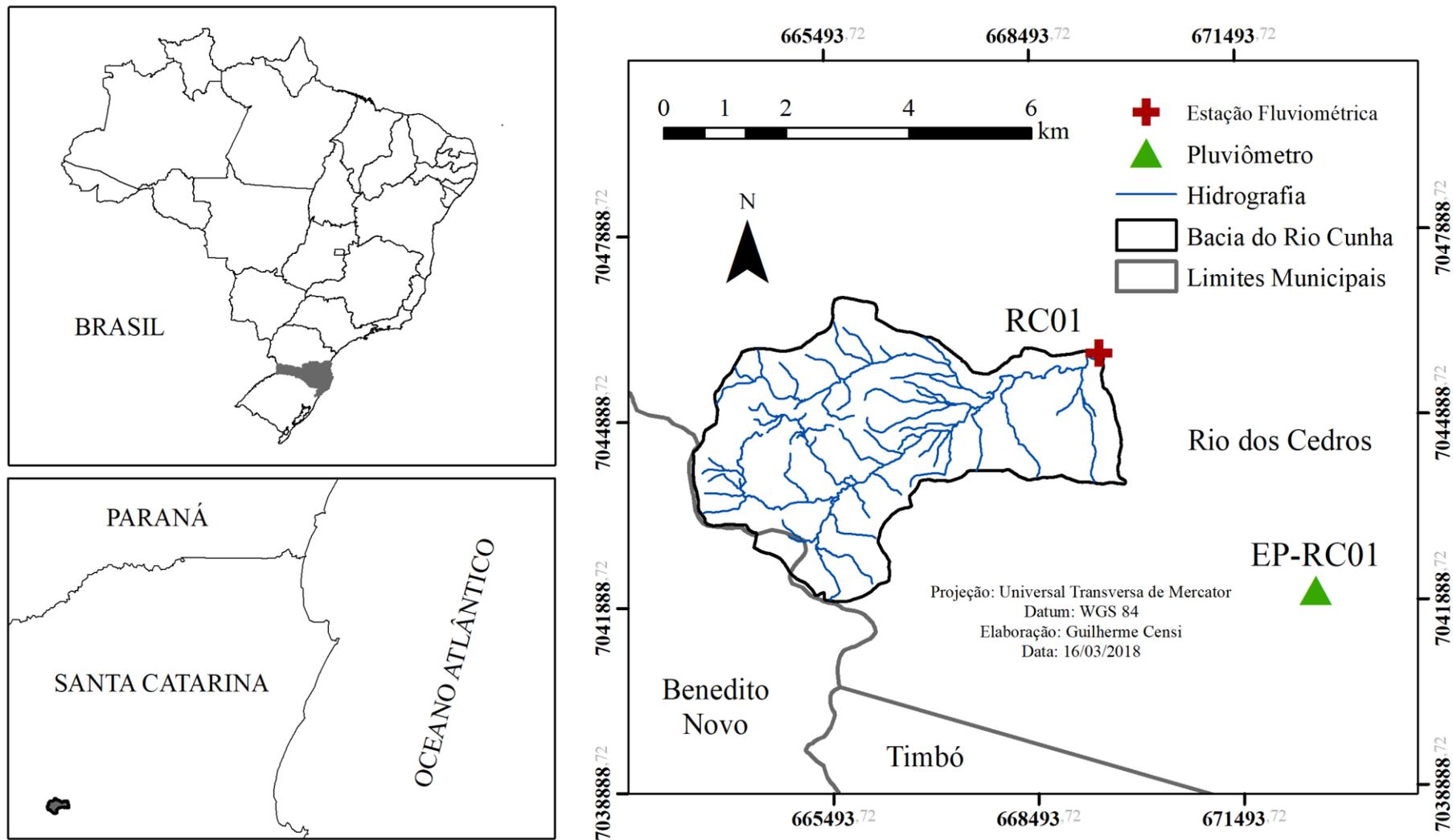
A bacia hidrográfica do Rio Cunha possui área de 16,72 km² e está localizada dentro dos limites do município de Rio dos Cedros, Santa Catarina. O mapa de localização da bacia é apresentado na Figura 17.

A amplitude altimétrica da bacia do Rio Cunha é de 762 m, baseado na diferença de cota do ponto mais baixo, no exutório, e do ponto mais alto da bacia, na cabaceira. Considerando as classes de declividade propostas pela Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária (1979), a maior parte da área da bacia possui relevo Forte Ondulado, com declividades variando entre 20 e 45%. A segunda classe de relevo mais comum na área é o relevo Suave Ondulado, com declividades variando entre 8 e 20%. Diversos locais da bacia também apresentam encostas montanhosas, com declividades entre 45 e 75%, e escarpadas, cujas declividades são superiores a 75%. O mapa de declividades da bacia é apresentado no APÊNDICE A.

Conforme APÊNDICE B, na bacia hidrográfica do Rio Cunha são encontradas as unidades geológico-ambientais DSVMPasaf, DCGR2salc e DCGMGLgno.

A unidade DSVMPasaf é caracterizada por intercalações de sedimentos arenosos, siltico-argilosos e folhelhos, cuja topografia é de colinas amplas e suaves. A unidade é composta por arenitos finos, bem selecionados, siltitos e argilitos. Em alguns locais podem ocorrer diamictitos, rocha constituída por clastos e fragmentos de rochas pré-existentes imersos em matriz siltico-argilosa. As rochas formam um empilhamento de camadas horizontalizadas com características geomecânicas e hidráulicas bastante diferentes. Os aquíferos encontrados nessa unidade possuem baixa potencialidade para água subterrânea, mas quando ocorre, as águas podem ser duras (com grande quantidade de sais de cálcio e magnésio) devido às características mineralógicas locais. Os sedimentos são finamente laminados ou maciços, rijos e de alta cerosidade. Entretanto, desestabilizam-se com facilidade em taludes de cortes e são bastante suscetíveis à erosão. Em relevos mais acidentados é elevada a suscetibilidade à movimentos de massa, inclusive queda de blocos de rocha. Os solos são aluminosos, em geral, argilosos, aderentes e escorregadios quando molhados, de difícil manejo. Podem conter argilominerais expansivos. Os terrenos possuem baixa a muito baixa permeabilidade (CPRM, 2010).

Figura 17 – Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Cunha



A unidade DCGR2salc é caracterizada por séries graníticas subalcalinas, ocorrendo em domínio montanhoso, cujos terrenos apresentam, predominantemente, relevos acidentados e declivosos. As rochas possuem comportamento geomecânico anisotrópico e a estruturação na rocha resultante da deformação atua como planos de descontinuidade geomecânica e hidráulica. A infiltração é limitada pelas fraturas. Os terrenos são suscetíveis a instabilidades em taludes de corte, principalmente quando as rochas se encontram alteradas. Nas áreas mais declivosas, os terrenos estão sujeitos à erosão e a movimentos de massa, entre os quais, quedas de blocos. A maior parte dos terrenos não apresenta características de aquífero. Nesta unidade predominam solos pouco evoluídos, pouco profundos a rasos, com textura argilosa a média, moderadamente drenados. Os solos são muito aluminosos e pouco férteis, praticamente improdutivos (CPRM, 2010).

A unidade DCGMGLgno é caracterizada por gnaisses granulíticos ortoderivados e podem conter porções migmatíticas, cuja topografia é de escarpas serranas. Os migmatitos ortoderivados ocorrem em uma estreita faixa alongada segundo a direção nordeste constituída por rochas que alternam níveis de composições distintas. Os locais em que predominam os gnaisses paraderivados ocorrem geralmente em pequenos afloramentos descontínuos, aparentemente encaixados em gnaisses granulíticos. Corpos de quartzitos são frequentes na região. As rochas são muito fraturadas, portadoras de muitas superfícies planares que atuam como descontinuidades geomecânicas e hidráulicas. Tal característica favorece a ocorrência de queda de blocos e instabilidades em taludes de corte, principalmente quando as rochas se encontram alteradas. As áreas com declividades maiores são suscetíveis à erosão e a movimentos de massa. Os terrenos com relevos mais baixos apresentam pequeno potencial para ocorrência de água subterrânea. Nesta unidade predominam solos residuais pouco evoluídos, os quais costumam apresentar fragmentos de rocha. Os solos são em geral espessos, argilo-siltosos, ricos em cálcio e magnésio, com boa fertilidade natural. Entretanto, os solos gradados a partir dos gnaisses paraderivados possuem baixa fertilidade natural e são muito aluminosos (CPRM, 2010).

Nesta bacia predominam os solos do tipo Cambissolos Distróficos, Eutróficos e Álicos. Esses solos estão associados principalmente ao relevo montanhoso da região. As áreas mais planas e os terraços fluviais da bacia são compostos por Argissolo Vermelho-Amarelo Latossólico Alumínico. Ambas as classes de solo encontradas na bacia apresentam textura argilosa a muito argilosa (MICHEL, 2013). O mapa de solos da bacia é apresentado no APÊNDICE C.

Conforme a classificação climática de *Köppen-Geiger*, o clima na região é do tipo Cfb, temperado, com estações de Verão e Inverno bem definidas. Esse tipo de clima também é caracterizado por ser constantemente úmido, sem estação seca definida e com Verão ameno. Durante o ano, a temperatura máxima pode chegar a 28°C, enquanto a mínima fica em torno de 11°C. A temperatura média anual varia de 19 a 20°C. A precipitação total anual pode variar de 1.500 e 1.900 mm, bem distribuídos ao longo do tempo. A evapotranspiração, dependendo da altitude entre outros fatores, varia de 800 a 1.000 mm por ano. A umidade relativa do ar se mantém entre 82 e 84% (PANDOLFO et al., 2002).

Como pode ser observado no mapa de uso e ocupação do solo do APÊNDICE E, a bacia do Rio Cunha é pouco urbanizada. Cerca de 70% da área da bacia é coberta por mata nativa,

caracterizada por floresta ombrófila densa. Dentro desse ambiente, há a presença de floresta montana e, principalmente, vegetação secundária, representada por ervas, arbustos e árvores de pequeno a grande porte (IBGE, 2004). Na bacia também são encontradas áreas de reflorestamento, onde as culturas produzidas são pinheiros e eucaliptos. Nos locais em que o relevo é mais ameno, há grande incidência de pastagem, tomando cerca de 20% da área da bacia. Em menores proporções, o solo da bacia também é ocupado por campos agrícolas e edificações (MICHEL, 2013).

4.3.2. Bacias Hidrográficas do Rio dos Bugres

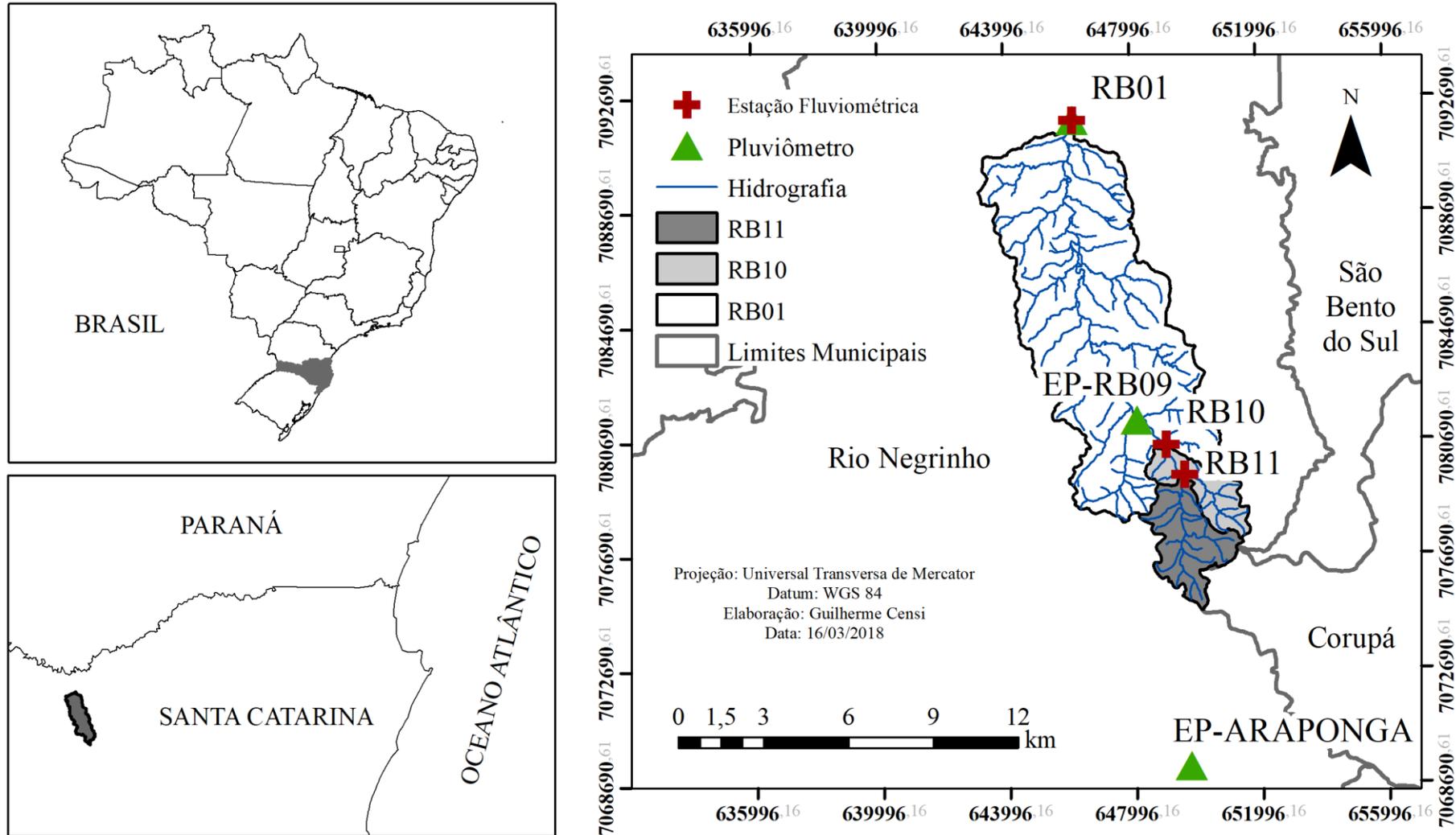
A área de estudo da região do Rio dos Bugres é composta pela bacia hidrográfica do Rio dos Bugres e por duas bacias embutidas nesta. Para identificar as bacias convencionou-se chamar a bacia hidrográfica do Rio dos Bugres de RB01 (64,41 km²), e as bacias embutidas de RB10 (11,45 km²) e RB11 (7,03 km²), sendo esta última a menor. Estas bacias estão localizadas na região norte do estado de Santa Catarina, dentro dos limites do município de Rio Negrinho. O mapa de localização da bacia é apresentado na Figura 18.

Considerando a diferença de cota do ponto mais baixo e do ponto mais alto de cada bacia hidrográfica, a amplitude altimétrica para a bacia RB01 é 197 m, para a bacia RB10 é 154 m e para a bacia RB11 é 153 m. Áreas de relevo ondulado predominam na região próxima ao exutório da bacia RB01, com declividades de 0 a 20%. Áreas de relevo forte ondulado são encontradas principalmente na cabeceira da bacia RB01 e em toda a região das bacias RB10 e RB11. Em alguns pontos há encostas montanhosas e escarpadas, onde a inclinação é maior do que 45%. Os valores médios de inclinação do terreno variam de 19% a 22%, com mínima de 0% e máximas entre 115 e 143% para todas as bacias. O mapa de declividades é apresentado no APÊNDICE F.

Conforme o APÊNDICE G as bacias hidrográficas RB01, RB10 e RB11 estão enquadradas dentro da unidade geológico-ambiental DSVMPasaf, caracterizada por intercalações de sedimentos arenosos, siltico-argilosos e folhelhos, cuja topografia é de colinas amplas e suaves. Nesta unidade, os aquíferos possuem baixa potencialidade para água subterrânea, mas quando ocorre, as águas podem ser duras. Os sedimentos são finamente laminados ou maciços, rijos e de alta cerosidade. Entretanto, desestabilizam-se com facilidade em taludes de cortes e são bastante suscetíveis à erosão. Em relevos mais acidentados é elevada a suscetibilidade à movimentos de massa, inclusive queda de blocos de rocha. Os solos são aluminosos, em geral, argilosos, aderentes e escorregadios quando molhados, de difícil manejo. Podem conter argilominerais expansivos. Os terrenos possuem baixa a muito baixa permeabilidade (CPRM, 2010).

O mapa do APÊNDICE H mostra que os solos predominantes nas bacias são Cambissolos, que são solos minerais caracterizados por uma relação média a alta de silte/argila ou pela presença de minerais primários de fácil decomposição (CARDOSO, 2013). Os Cambissolos são resultado do intemperismo que age sobre rochas sedimentares com elevados teores de matéria orgânica e baixa fertilidade natural, geralmente ocorrendo em áreas com relevo ondulado e suave ondulado (SANTA CATARINA, 1986).

Figura 18 – Mapa de Localização das Bacias Hidrográficas RB01, RB10 e RB11



Considerando a classificação climática de *Köppen-Geiger*, o clima na região é do tipo Cfb, temperado, com estações de Verão e Inverno bem definidas. As regiões com esse tipo de clima costumam ser úmidas durante todo o ano, não possuem estação seca definida e apresentam Verão mais ameno. Durante o ano, a temperatura máxima pode chegar a 27°C, enquanto a mínima fica próxima de 11°C. A temperatura média anual varia de 15 a 17°C. A precipitação total anual pode variar de 1.360 a 1.670 mm, bem distribuídos ao longo do tempo. A evapotranspiração média varia de 700 a 900 mm por ano e a umidade relativa do ar se mantém entre 80 e 86% (PANDOLFO et al., 2002).

O mapa do APÊNDICE J mostra o uso e ocupação das bacias do Rio dos Bugres. Originalmente, a área das bacias era caracterizada por mata nativa do tipo Floresta Ombrófila Mista Montana, entretanto, a partir da ocupação humana parte desta vegetação foi retirada e o solo recebeu novos usos (CARDOSO, 2013). Nas porções de terra mais baixas, a bacia RB01 apresenta vastas áreas utilizadas para fins de agricultura e pastagem para criação de gado, enquanto as áreas de cabeceira da bacia ainda são ocupadas por florestas, seja nativa ou de reflorestamento. A bacia RB01, que fica embutida justamente na região de cabeceira da bacia RB01, tem sua área ocupada em maior proporção por mata nativa e mata de reflorestamento, além de apresentar uma pequena porção de sua área utilizada para pastagem. Já a bacia RB11, também localizada na região de cabeceira da bacia RB01, ainda permanece bastante intocada, sendo basicamente coberta por florestas nativas e uma pequena porção de área reflorestada.

4.4. Dados de Precipitação

Os valores de precipitação utilizados como dado de entrada para o Tank Model foram obtidos por meio de estações pluviométricas instaladas nas bacias hidrográficas de estudo ou próximo a elas. A Tabela 9 apresenta a relação de estações pluviométricas utilizadas, enquanto a localização das estações pode ser observada nos mapas de localização da Figura 17 e Figura 18.

Tabela 9 – Estações pluviométricas

No.	Estação Pluviométrica	Intervalo de Aquisição de Dados (min)	Observação
1	EP-RC01	5	Utilizada para a bacia do Rio Cunha. Os dados foram transformados para 10 minutos para compatibilizar com os demais dados hidrológicos.
2	EP-RB01	10	Utilizada para a bacia RB01.
3	EP-RB09	10	Utilizada para a bacia RB10 e RB11. Devido a problemas de vandalismo, após o dia 09/05/2012 não foi mais possível utilizar esta estação.
4	EP-ARAPONGA	5	Utilizada para a bacia, RB10 e RB11. Os dados foram transformados para 10 minutos para serem utilizados no método de Thiessen junto com os dados dos outros pluviômetros.

Para esse estudo, a estação pluviométrica utilizada na bacia do Rio Cunha é denominada EP-RC01. Nas bacias embutidas do Rio dos Bugres, as estações são denominadas EP-RB01, EP-RB09 e EP-ARAPONGA.

O monitoramento pluviométrico para todas as estações foi realizado automaticamente com intervalo de amostragem de 10 minutos, exceto para as estações EP-RC01 e EP-ARAPONGA. Nessas estações o monitoramento foi realizado com aquisição de dados a cada cinco minutos. Para manter a compatibilidade entre os dados fornecidos pelas estações, os registros de cinco minutos foram transformados para 10 minutos.

Para o monitoramento da precipitação na bacia do Rio Cunha foi utilizada uma estação meteorológica modelo DAVIS Vantage Pro2 Plus. Eventuais falhas desta estação foram corrigidas utilizando os dados de outras cinco estações fornecidos pelo Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina – CIRAM, vinculado a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina – EPAGRI (GOERL, 2014).

Para a bacia do Rio Cunha, onde havia apenas um pluviômetro, a medida de precipitação registrada foi considerada como sendo homogênea para toda a bacia.

Na bacia do Rio dos Bugres o monitoramento da precipitação foi realizado inicialmente com três estações pluviométricas automáticas instaladas pela equipe do Laboratório de Hidrologia – LabHidro, da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Todavia, devido a problemas de vandalismo, após o dia 09 de maio de 2012 a integridade da estação EP-RB09 foi comprometida e seus dados foram desconsiderados após essa data. O método de Thiessen foi utilizado para realizar a distribuição espacial dos valores medidos nas estações e encontrar um valor médio de precipitação para as bacias (CARDOSO, 2013).

4.5. Dados de evapotranspiração

Dados de evapotranspiração também foram utilizados como entrada para o Tank Model. Em face à inexistência de dados medidos e considerando que o efeito da evapotranspiração não é tão relevante para a simulação de eventos de curto período, foram considerados valores de evapotranspiração de referência (ET_o) (PANDOLFO et al., 2002). A Tabela 10 apresenta a evapotranspiração de referência mensal para as bacias hidrográficas RB01, RB10, RB11 e do Rio Cunha.

A evapotranspiração de referência, originalmente introduzida sob o termo evapotranspiração potencial (ET_p), é um elemento indicativo da demanda hídrica das culturas de um determinado local e período. Conceitualmente, a ET_o é definida como a evapotranspiração de uma superfície vegetada com uma cultura hipotética, cujas características se assemelham à evapotranspiração da grama, altura de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da cultura ao transporte de vapor d'água igual a 69 s.m^{-1} (CARVALHO et al., 2011).

Tabela 10 – Evapotranspiração de referência (*ET_o*) por mês

Mês	Evapotranspiração de Referência (mm/mês)			
	CUNHA	RB01	RB10	RB11
Janeiro	125	100	100	100
Fevereiro	110	90	90	90
Março	100	85	85	85
Abril	75	60	60	60
Maiο	55	45	45	45
Junho	40	35	35	35
Julho	35	35	35	35
Agosto	45	45	45	45
Setembro	55	50	50	50
Outubro	75	65	65	65
Novembro	90	80	80	80
Dezembro	110	95	95	95

4.6. Análise e tratamento de dados

Nesse trabalho a abordagem da simulação foi baseada em eventos, assim o modelo não foi aplicado de forma contínua para a série de dados. Essa abordagem foi adotada devido ao tamanho reduzido das séries de dados hidrossedimentológicos disponíveis e sem falhas.

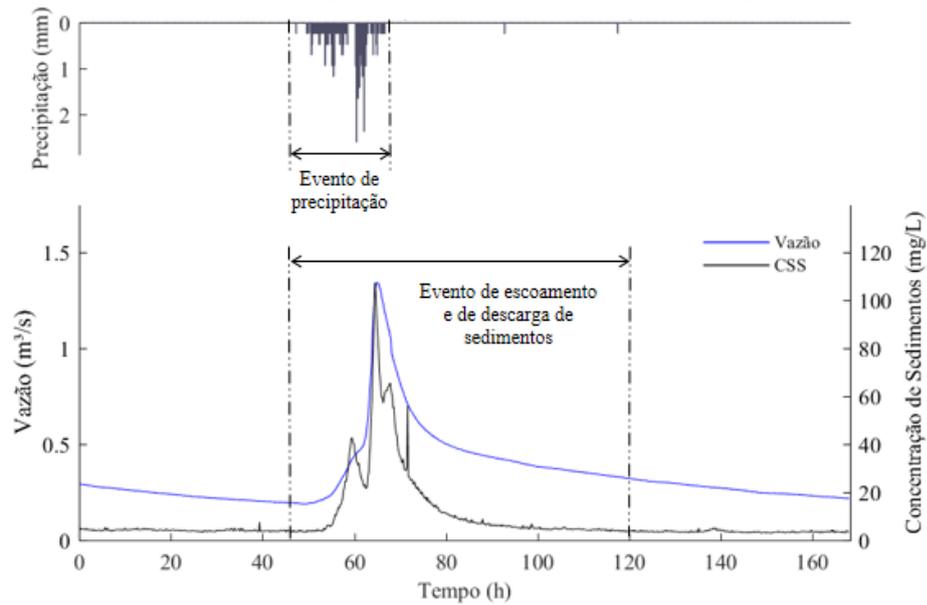
Os dados fornecidos por cada estação fluviométrica foram analisados e a série foi dividida em eventos hidrossedimentológicos para realizar as etapas de calibração dos parâmetros do Tank Model e posterior validação do modelo.

Considerou-se a definição de evento hidrossedimentológico proposta por Cardoso (2013), caracterizado como um episódio hidrossedimentológico que abrange a precipitação e a ascensão e o decréscimo do hidrograma e do sedimentograma. O hidrograma é a curva que descreve o comportamento do escoamento ao longo do tempo e o sedimentograma é a curva que descreve o comportamento do fluxo de sedimentos ao longo do tempo. A Figura 19 apresenta um exemplo de evento hidrossedimentológico com identificação dos eventos de precipitação, de escoamento e de descarga de sedimentos.

Para cada bacia hidrográfica considerada no estudo foram separados três eventos hidrossedimentológicos para calibração e mais dois eventos para validação do Tank Model.

Entretanto, antes de proceder a divisão da série de dados contínua em eventos hidrossedimentológicos particulares, a série de cada bacia foi analisada em busca de falhas. Entende-se como falha na série a presença de lacunas de dados, sejam dados de precipitação, escoamento e/ou CSS. A ausência de dados foi tomada como critério para estabelecer pontos de corte da série contínua. As porções com falha foram descartadas e as séries divididas. Assim, a série contínua com falhas foi dividida em séries contínuas individuais sem falhas.

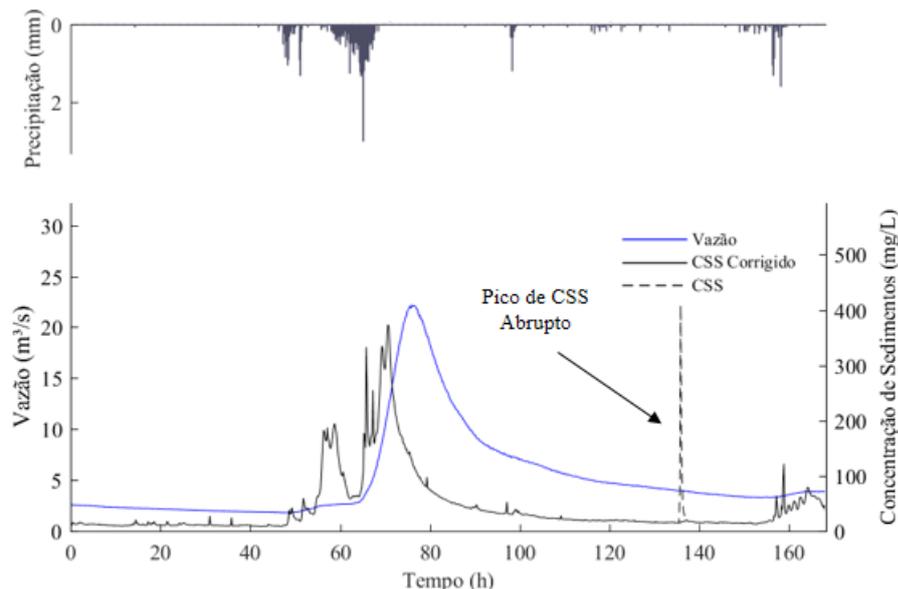
Figura 19 – Exemplo de evento hidrossedimentológico



Além do mais, as séries de dados foram vasculhadas para verificar a presença de eventos de pico abrupto de CSS desencadeados por processos diferentes da erosão laminar, tais como escorregamentos, remobilização de sedimentos depositados no canal, atividade antrópica, entre outros. A correção da série de concentração de sedimentos foi necessária para evitar erros durante a etapa de modelagem hidrossedimentológica, visto que o Tank Model foi modificado para simular apenas eventos associados à erosão distribuída sobre a superfície da bacia.

Nos pontos da série de dados identificados com picos abruptos de CSS os valores foram corrigidos. O procedimento consistiu em atenuar o pico de concentração para corresponder à concentração normal da série seguindo a tendência dos valores. A Figura 20 apresenta um exemplo de evento de pico abrupto de CSS para o qual a série foi corrigida.

Figura 20 – Exemplo de evento de pico de CSS abrupto

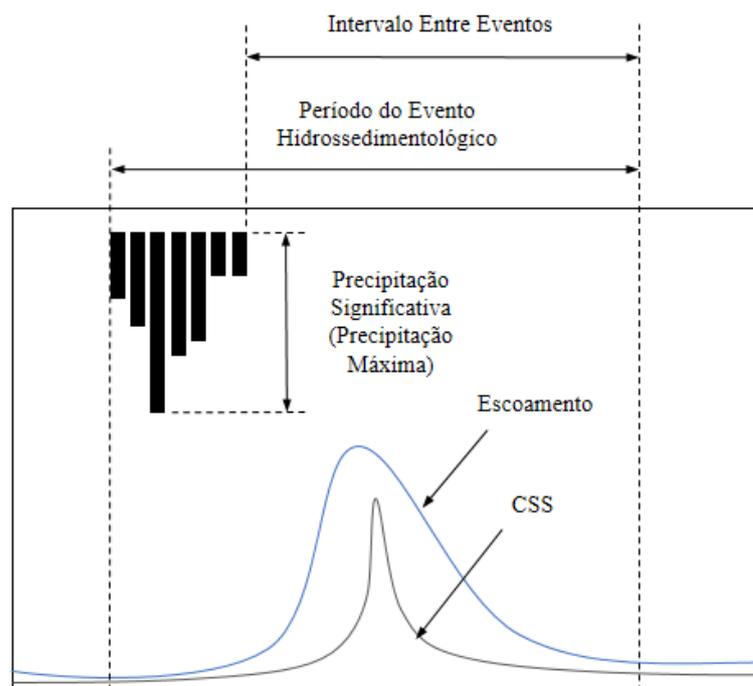


A elevação abrupta da concentração de sedimentos sem vínculo direto com um evento de precipitação antecedente indica a ocorrência de grande aporte de sedimentos para o rio não relacionado à erosão distribuída sobre a superfície da bacia hidrográfica.

Após a análise e tratamento da série de dados para eliminação de falhas de descontinuidade e picos abruptos de CSS, as séries de dados foram divididas em eventos hidrossedimentológicos. Para automatizar o processo foi desenvolvido um algoritmo em linguagem MATLAB para separar eventos hidrossedimentológicos a partir de séries de dados. O algoritmo é apresentado no APÊNDICE K.

Para aplicação do algoritmo é necessário definir a precipitação significativa a ser considerada e o intervalo entre eventos. A precipitação significativa determina a magnitude mínima a ser considerada para a separação dos eventos hidrossedimentológicos. São separados apenas os eventos que apresentam precipitação máxima igual ou superior a chuva significativa pré-definida. Já o intervalo entre eventos é definido como o intervalo de tempo que distingue um evento hidrossedimentológico de outro, contando a partir do momento em que cessa a precipitação. O seu valor está associado ao tempo de resposta do hidrograma após um evento de precipitação e deve ser equivalente ao tempo necessário para ocorrência da ascensão do hidrograma até atingir um pico, seguido pela recessão. A Figura 21 ilustra a definição de precipitação significativa a ser considerada e de intervalo entre eventos.

Figura 21 – Definição de precipitação significativa e de intervalo entre eventos



A Tabela 11 exibe os valores de precipitação significativa e intervalo entre eventos por bacia hidrográfica para determinação dos eventos hidrossedimentológicos.

Tabela 11 – Parâmetros utilizados no algoritmo de separação de eventos hidrossedimentológico por bacia hidrográfica

Bacia	Precipitação Significativa (mm)	Intervalo entre Eventos (h)
Cunha	0,5	15
RB01	0,5	24
RB10	0,5	24
RB11	0,5	24

Após a aplicação do algoritmo foi estruturada a base de dados de eventos hidrossedimentológicos para as bacias. A análise particular de cada evento separado demonstrou que o valor de intervalo entre eventos definido foi demasiado ou insuficiente para alguns casos. Para os casos em que o intervalo foi demasiado uma porção do final da série de dados do evento foi eliminada. Para os casos em que o intervalo foi insuficiente a série de dados do evento foi estendida para compreender toda a extensão do evento hidrossedimentológico.

4.7. Calibração do modelo

No presente trabalho, a calibração dos parâmetros do Tank Model foi realizada empregando o algoritmo de otimização denominado *Elitist Nondominated Sorting Genetic Algorithm* – NSGA-II (DEB et al., 2000).

A calibração foi procedida de forma automática e como base foi utilizado o algoritmo NSGA-II de código aberto em MATLAB, desenvolvido e disponibilizado na plataforma MathWorks¹ por Seshadri (2009).

4.7.1. Parâmetros de entrada do Tank Model

A utilização do NSGA-II requer a definição de alguns parâmetros de entrada. O tamanho da população, que se refere ao número de indivíduos que compõe o conjunto de soluções, foi definido como duzentos indivíduos (população = 200) para todos os procedimentos de calibração executados. O critério de parada do algoritmo definido pelo número de gerações foi estabelecido em quinhentas iterações (gerações = 500). Os parâmetros de calibração do Tank Model assim como suas respectivas faixas de variação estão descritos na Tabela 12. A faixa de variação é definida por um valor mínimo e um valor máximo que cada um dos parâmetros do Tank Model pode assumir. Esses limites foram definidos a partir de testes preliminares com valores de referência apresentados por Lee e Singh (2005) e Vasconcellos (2017). Para definição da faixa de variação também foram observadas as recomendações de Sugawara (1979) e Suryoputro et al. (2017).

¹ A MathWorks, Inc. (conhecida simplesmente como MathWorks) é uma corporação de capital privado americana especializada em software de computação matemática. A página online da corporação possui uma plataforma onde os usuários de seus produtos podem compartilhar conhecimento.

Tabela 12 – Parâmetros de calibração e faixa de variação

No.	Parâmetro	Descrição	Faixa de Variação							
			CUNHA		RB01		RB10		RB11	
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
1	<i>SI</i>	Altura inicial de armazenamento do tanque 1	0	1,5	0	1,5	0	1,5	0	1,5
2	<i>S2</i>	Altura inicial de armazenamento do tanque 2	10	150	10	150	10	150	10	250
3	<i>A0</i>	Coefficiente de infiltração do tanque 1	0,01	0,9	0,0001	0,09	0,001	0,09	0,001	0,009
4	<i>B0</i>	Coefficiente de infiltração do tanque 2	0,0001	0,009	0,0001	0,009	0,00001	0,0009	0,0001	0,009
5	<i>A1</i>	Coefficiente de escoamento da saída lateral inferior do tanque 1	0,0001	0,009	0,00001	0,009	0,0001	0,0009	0,00001	0,0009
6	<i>A2</i>	Coefficiente de escoamento da saída lateral superior do tanque 1	0,001	0,09	0,001	0,09	0,001	0,09	0,001	0,009
7	<i>B1</i>	Coefficiente de escoamento da saída lateral do tanque 2	0,00001	0,00009	0,00001	0,09	0,00001	0,0009	0,000001	0,00009
8	<i>HA1</i>	Altura da saída lateral inferior do tanque 1	0	30	0	30	0	30	0	30
9	<i>HA2</i>	Altura da saída lateral superior do tanque 1	30	70	30	200	30	70	30	70
10	<i>HB1</i>	Altura da saída lateral do tanque 2	0	50	0	50	0	50	0	50
11	<i>X</i>	Concentração de sedimentos da bacia	0	50	0	50	0	50	0	50
12	<i>SM1</i>	Massa de sedimentos inicial do tanque 1	0	100	0	500	0	100	0	100

O Tank Model modificado utilizado possui 12 parâmetros para calibração. Desse total, oito parâmetros são considerados fundamentais ($A0$, $B0$, $A1$, $A2$, $B1$, $HA1$, $HA2$ e HBI), dois parâmetros são relacionados ao armazenamento inicial dos tanques ($S1$ e $S2$) e outros dois são relacionados à condição inicial de sedimentos no tanque (X e SM). Apesar dos parâmetros relacionados à altura inicial de armazenamento nos tanques ($S1$ e $S2$), assim como a concentração de sedimentos (X) e a massa de sedimentos inicial (SMI) não serem realmente parâmetros do modelo, há a necessidade de otimizá-los.

Assumindo que o primeiro tanque do modelo representa a superfície da bacia e que há uma condição de baixa umidade inicial antes da ocorrência de precipitação, foi utilizada uma pequena faixa de variação para o parâmetro de armazenamento $S1$. E, assumindo que o segundo tanque representa a umidade subsuperficial e que pode ocorrer condição de umidade inicial, foi utilizada uma faixa de variação mais ampla para o parâmetro de armazenamento $S2$. A faixa de variação dos demais parâmetros foi ajustada durante o processo de calibração, avaliando-se a resposta da simulação até o ponto em que a ampliação dos limites mínimo e/ou máximo da faixa não gerava melhora expressiva na resposta do modelo.

Os parâmetros fundamentais mais aqueles relacionados ao armazenamento inicial dos tanques ($A0$, $B0$, $A1$, $A2$, $B1$, $HA1$, $HA2$, HBI , $S1$ e $S2$) foram calibrados visando compatibilizar os valores de escoamento observados e estimados, enquanto os parâmetros relacionados à condição inicial de sedimentos no tanque foram ajustados para compatibilizar os valores de descarga de sedimentos observados e estimados.

A calibração dos parâmetros do Tank Model ocorreu em duas etapas. Na primeira etapa o modelo foi calibrado e validado para os parâmetros fundamentais e os parâmetros relacionados ao armazenamento inicial dos tanques. Na segunda etapa o Tank Model foi aplicado para calibração dos parâmetros relacionados à condição inicial de sedimentos no tanque, sendo que os parâmetros calibrados e validados para simular o escoamento na etapa anterior foram definidos como parâmetros de entrada do modelo.

4.7.2. Funções objetivo

As funções objetivo consideradas para calibração dos parâmetros do modelo foram o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) proposto por Nash e Sutcliffe (1970) e a Raiz Quadrada do Erro-Médio do Inverso da Predição ($RMSEI$), cujas metodologias de cálculo são, respectivamente:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (23)$$

$$RMSEI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{O_i} - \frac{1}{E_i} \right)^2}{n}} \quad (24)$$

onde, O_i é o i -ésimo valor observado ou medido; \bar{O} é a média dos valores observados; E_i é o i -ésimo valor estimado pelo modelo; e n é o número total de observações.

O Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) é uma métrica estatística normalizada que sintetiza a magnitude relativa da variância residual (ruído) comparada com a variância dos dados observados (informação). O NS varia entre $-\infty$ (infinito negativo) e 1 (um). Valores entre 0 (zero) e 1 (um) geralmente são considerados aceitáveis para a performance do modelo, sendo que $NS = 1$ é o valor ótimo e indica que a estimativa do modelo é perfeita. Valores negativos de NS indicam que o modelo é ineficiente e a média dos valores observados é melhor estimadora do que o próprio modelo (MORIASI et al., 2007).

Moriasi et al. (2007) sugerem que a simulação de um modelo pode ser considerada satisfatória se $NS > 0,50$. Por outro lado, Van Liew et al. (2007) propuseram uma sistemática de classificação mais detalhada quanto ao valor de NS , conforme os autores: para valores de $NS > 0,75$, o modelo é adequado e bom; para valores de $0,36 < NS < 0,75$, o modelo é considerado satisfatório; e para valores de $NS < 0,36$ o modelo não é satisfatório. Por ser mais detalhada, a proposta de classificação de Van Liew et al. (2007) foi utilizada no presente trabalho para avaliar os resultados de calibração e validação do Tank Model.

A Raiz Quadrada do Erro-Médio do Inverso da Predição ($RMSEI$) é usado para expressar a acurácia dos resultados numéricos estimados pelo modelo. Em relação à Raiz Quadrada do Erro-Médio ($RMSE$), o $RMSEI$ possui a vantagem de ser mais sensível aos erros nos valores de mínimos da predição (COLLISCHONN; TUCCI, 2003). O $RMSEI$ varia do valor ideal 0 (zero) até $+\infty$ (infinito positivo), sendo que quanto menor for seu valor, menor o erro da predição e melhor o desempenho da simulação do modelo.

Estas métricas complementares foram escolhidas para equilibrar a calibração, enquanto o NS prioriza o ajuste para valores de máximos, observados nos picos do hidrograma e do sedimentograma, o $RMSEI$ prioriza o ajuste para os valores de mínimos, observados antes da ascensão e após a recessão do hidrograma e do sedimentograma do evento hidrossedimentológico.

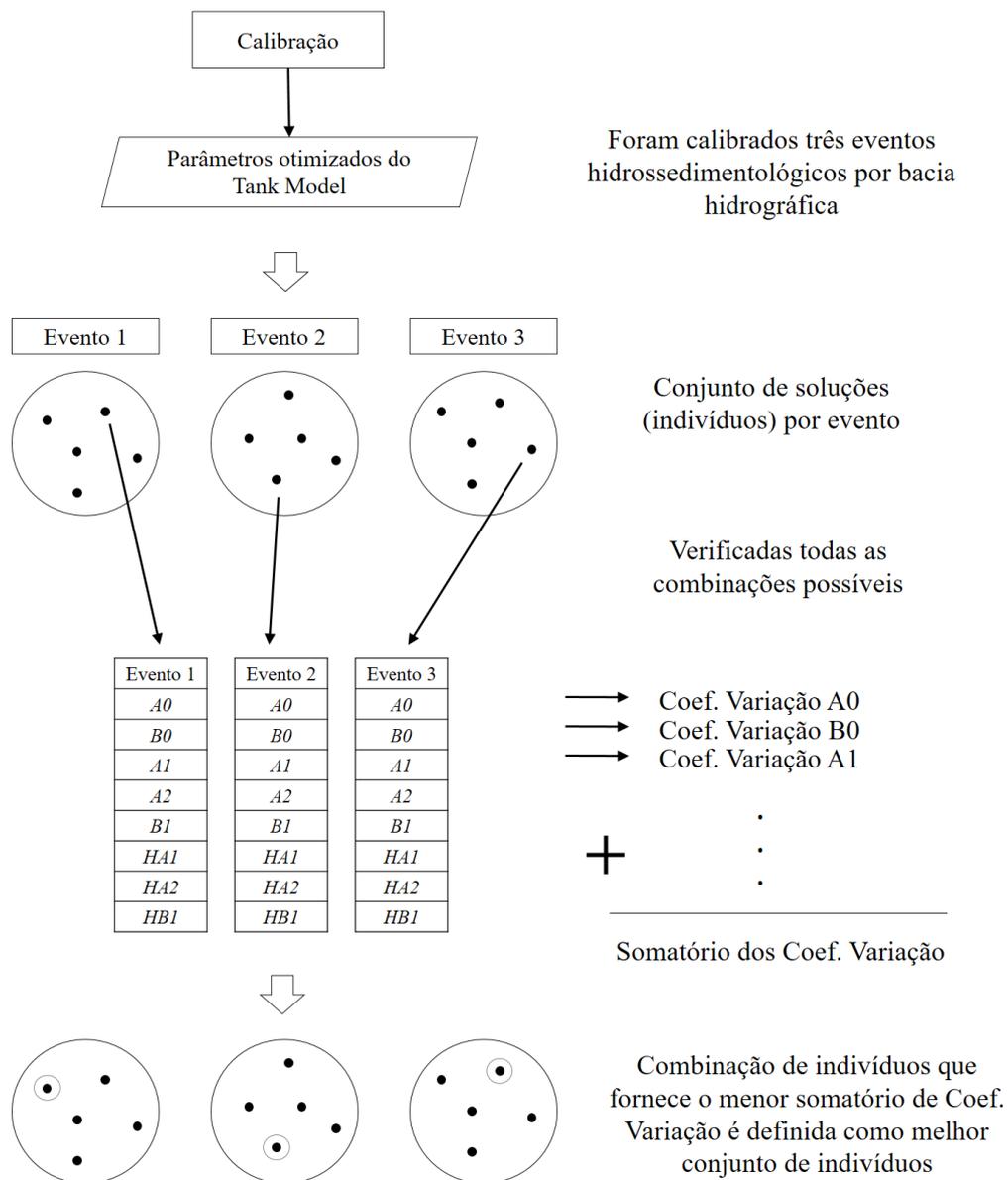
4.8. Calibração dos parâmetros para simulação do escoamento

Para cada evento hidrossedimentológico, o procedimento de calibração dos parâmetros fundamentais do Tank Model ($A0$, $B0$, $A1$, $A2$, $B1$, $HA1$, $HA2$ e HBI) e dos parâmetros relacionados ao armazenamento inicial ($S1$ e $S2$) gerou um conjunto de 200 soluções que forneceram as melhores estimativas de escoamento. A partir desse conjunto de soluções foi necessário definir a solução que forneceu a melhor estimativa.

Geralmente trabalhos que aplicam a calibração do Tank Model utilizando uma abordagem baseada em eventos determinam o valor ótimo de cada parâmetro por meio da média ou da mediana dos resultados encontrados para cada evento hidrossedimentológico calibrado. A média e a mediana são medidas que podem ser usadas para representar o valor central do conjunto de resultados. A tendência central calculada pela média é mais afetada por valores extremos, sejam muito altos ou muito baixos em relação ao conjunto de resultados. Por outro lado, a mediana possui uma vantagem nesse aspecto, pois não é afetada por valores extremos. Independente da medida de tendência central aplicada, é desejável que os resultados para cada

parâmetro sejam próximos para todos os eventos calibrados. Isso favorece a definição do valor ótimo de cada parâmetro que está relacionado com as características da bacia hidrográfica e é independente do evento hidrossedimentológico. Por essa perspectiva, as soluções encontradas nos três eventos hidrossedimentológicos analisados para cada bacia hidrográfica foram comparadas entre si para determinar a melhor solução para cada evento conforme a sequência de procedimentos detalhados na Figura 22.

Figura 22 – Fluxograma demonstrando as etapas para definição do melhor conjunto de soluções



A melhor solução para cada evento hidrossedimentológico foi aquela que combinada com as demais forneceu o menor Coeficiente de Variação (CV) para os valores dos parâmetros otimizados relacionados ao escoamento. O CV é uma medida de variabilidade dos dados em relação ao valor central independente da unidade de medida e é utilizada quando se deseja comparar a variação de conjuntos de observações. Aplicando esse coeficiente foi possível

definir as soluções que forneceram os resultados mais próximos para cada parâmetro fundamental do Tank Model após a calibração do modelo, sabendo que os resultados mais próximos entre si foram aqueles que forneceram a menor medida de *CV*.

O coeficiente de variação é calculado por:

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}}{\bar{z}} \quad (25)$$

onde, *CV* é o Coeficiente de Variação; z_i é o *i*-ésimo dado; \bar{z} é a média dos dados; *n* é o número de dados ou de observações.

Para definir o melhor conjunto de soluções, a variabilidade dos parâmetros relacionados à altura inicial de armazenamento (*S1* e *S2*) não foram considerados, pois entende-se que esses são apenas parâmetros que remetem à condição inicial do fenômeno simulado e, como mencionado anteriormente, não representam realmente um parâmetro do modelo, apesar da necessidade de calibrá-los.

Após encontrar o melhor conjunto de soluções para cada bacia hidrográfica, os valores ótimos dos parâmetros fundamentais do Tank Model foram determinados pela mediana dos resultados.

4.9. Validação do modelo para simulação do escoamento

Antes de proceder a validação, foi realizada a calibração dos parâmetros relacionados à altura inicial de armazenamento dos tanques (*S1* e *S2*) para cada evento hidrossedimentológico utilizado nessa etapa.

Para cada evento hidrossedimentológico, a calibração dos parâmetros *S1* e *S2* do Tank Model gerou um conjunto de 200 soluções que forneceram as melhores estimativas de escoamento. A melhor estimativa foi definida como sendo aquela que apresentou a menor distância euclidiana do ponto da fronteira de Pareto até o ponto ideal para as métricas *NS* e *RMSEI*. A distância euclidiana é calculada por:

$$d = \sqrt{(M_x - R_x)^2 + (M_y - R_y)^2} \quad (26)$$

onde, *d* é a distância euclidiana entre dois pontos no plano; M_x abscissa do ponto M; M_y ordenada do ponto M; R_x abscissa do ponto R; R_y ordenada do ponto R.

Na equação, o ponto M representa um ponto da fronteira de Pareto associado a uma solução cujos parâmetros associados fornece uma das melhores estimativas do modelo, enquanto o ponto R representa o ponto ideal das funções objetivo, alcançado somente quando a simulação é perfeita. Considerando que o eixo das abscissas descreve os valores de *NS* e o eixo das ordenadas descreve os valores de *RMSEI*, o ponto ótimo é dado por R(1,0).

Para eliminar a incompatibilidade de grandezas das funções objetivo, a distância euclidiana foi calculada utilizando os valores de *NS* e *RMSEI* normalizados, calculados por:

$$NS^* = \frac{NS - NS_{min}}{NS_{max} - NS_{min}} \quad (27)$$

$$RMSEI^* = \frac{RMSEI - RMSEI_{min}}{RMSEI_{max} - RMSEI_{min}} \quad (28)$$

onde, NS^* é o valor normalizado de NS ; NS_{min} é o valor mínimo de NS ; NS_{max} é o valor máximo de NS ; $RMSEI^*$ é o valor normalizado de $RMSEI$; $RMSEI_{min}$ é o valor mínimo de $RMSEI$; $RMSEI_{max}$ é o valor máximo de $RMSEI$.

Tendo os parâmetros otimizados, as estimativas de escoamento foram confrontadas com os dados observados por monitoramento em estações fluviométricas.

Para avaliação da qualidade de estimativas fornecidas por modelos hidrológicos, Moriasi et al. (2007) recomendam a utilização do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NS), da Razão do Erro Médio Quadrático pelo Desvio Padrão dos Dados Observados (RSR) e do Bias Percentual ($PBIAS$). As expressões RSR e $PBIAS$ são, respectivamente:

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (29)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \quad (30)$$

onde, O_i é o i -ésimo valor observado ou medido; \bar{O} é a média dos valores observados; E_i é o i -ésimo valor estimado pelo modelo; e n é o número total de observações.

A Razão do Erro Médio Quadrático Pelo Desvio Padrão dos Dados Observados (RSR) normaliza a Raiz Quadrada do Erro-Médio (RMSE) usando o desvio padrão dos valores observados. O RSR indica a qualidade do ajuste e por incluir um fator de escala permite que a estatística resultante e os valores relatados possam ser comparados. O RSR varia do valor ideal 0 (zero), o qual indica variação residual nula, até $+\infty$ (infinito positivo). Quanto menor o RSR , menor o RMSE e melhor o desempenho da simulação do modelo. Segundo Moriasi et al. (2007), o modelo é considerado satisfatório se $RSR < 0,70$.

O Bias Percentual ($PBIAS$) mede a tendência média dos dados estimados em relação aos dados observados. Valores negativos de $PBIAS$ indicam viés de subestimação do modelo, enquanto valores positivos indicam viés de superestimação. O valor ideal é 0 (zero), com valores de baixa magnitude indicando simulação precisa do modelo (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1999). Uma desvantagem do uso dessa métrica está na ocorrência do cancelamento de um valor positivo por um negativo. Isto significa que, caso a soma de erros positivos seja igual à soma de erros negativos, o $PBIAS$ apresenta um valor imparcial. O modelo pode ser classificado como satisfatório se $PBIAS \pm 25\%$ para escoamento e $PBIAS \pm 55\%$ para descarga de sedimentos.

As métricas estatísticas utilizadas para calibração e validação do Tank Model são resumidas na Tabela 13.

Tabela 13 – Lista de métricas estatísticas

Métrica	Faixa de Valores	Valor Perfeito	Calibração	Validação
Coefficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (<i>NS</i>)	$(-\infty, 1]$	1	X	X
Raiz Quadrada do Erro-Médio do Inverso da Predição (<i>RMSEI</i>)	$(0, +\infty)$	0	X	X
Razão do Erro Médio Quadrático Pelo Desvio Padrão dos Dados Observados (<i>RSR</i>)	$[0, +\infty)$	0		X
Bias Percentual (<i>PBIAS</i>)	$(-\infty, +\infty)$	0		X

No total foram utilizadas quatro métricas estatísticas distintas para avaliar a adequação do Tank Model para estimativa do escoamento.

4.10. Calibração dos parâmetros para simulação da descarga de sedimentos

Após a calibração e validação do Tank Model para escoamento, o modelo foi aplicado para simular a descarga de sedimentos. Para isso, os parâmetros calibrados e validados para o escoamento foram definidos como parâmetros de entrada do modelo e, para cada evento hidrossedimentológico, a concentração de sedimentos (*X*) e a massa de sedimentos inicial (*SMI*) foram calibrados.

Para cada evento hidrossedimentológico, a calibração dos parâmetros *X* e *SMI* do Tank Model gerou um conjunto de 200 soluções que forneceram as melhores estimativas de descarga de sedimentos. Assim como na etapa de validação do modelo para o escoamento, a melhor estimativa foi definida como sendo aquela que apresentou a menor distância euclidiana do ponto da fronteira de Pareto até o ponto ideal para as métricas *NS* e *RMSEI*, considerando os valores normalizados dessas métricas (*NS** e *RMSEI**).

A qualidade das estimativas de descarga de sedimentos também foi avaliada em termos das métricas *NS*, *RMSEI*, *RSR* e *PBIAS*.

4.11. Características das bacias hidrográficas

Fatores morfológicos, geológicos, do solo, do uso do solo e climático-hidrológicos são determinantes para o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica (HORTON, 1932). As características da bacia interferem no comportamento da drenagem e também da produção de sedimentos. Assim, para executar a regionalização dos parâmetros do Tank Model foram estabelecidas 37 métricas capazes de descrever as características da bacia considerando esses fatores.

A Tabela 14 apresenta as métricas relacionadas às características morfológicas da bacia hidrográfica.

Tabela 14 – Métricas relacionadas às características morfológicas da bacia hidrográfica

No.	Símbolo	Definição	Unidade
1	<i>Ab</i>	Área da Bacia	km ²
2	<i>Pe</i>	Perímetro da Bacia	km
3	<i>Am</i>	Altitude Média	m
4	<i>Kc</i>	Coefficiente de Compacidade	-
5	<i>Kf</i>	Fator de Forma	-
6	<i>Ic</i>	Índice de Circularidade	-
7	<i>Dm</i>	Declividade Média da Bacia	%
8	<i>Dp</i>	Declividade – Porção de Área Plano	%
9	<i>Dso</i>	Declividade – Porção de Área Suave Ondulado	%
10	<i>Do</i>	Declividade – Porção de Área Ondulado	%
11	<i>Dfo</i>	Declividade – Porção de Área Forte Ondulado	%
12	<i>Dmo</i>	Declividade – Porção de Área Montanhoso	%
13	<i>De</i>	Declividade – Porção de Área Escarpado	%
14	<i>Dr</i>	Comprimento da Rede de Drenagem	km
15	<i>Ct</i>	Comprimento do Rio Principal	km
16	<i>Dd</i>	Densidade de Drenagem	km.km ²

Os índices referentes às características morfológicas da bacia foram obtidos com técnicas de geoprocessamento utilizando o software ArcGIS® ArcMap™ 10.3.

Para extrair os índices de declividade e altitude de cada bacia foi utilizado como base o Modelo Digital de Elevação – MDE obtido na plataforma *Alaska Satellite Facility* – ASF². Os dados possuem uma resolução espacial de 12,5 metros, mas foram originalmente capturados com resolução de 10 metros no ano de 2011 pelo sensor *Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar* – PALSAR embarcado no satélite japonês *Advanced Land Observing Satellite* – ALOS.

Os índices de Densidade de Drenagem e Comprimento do Rio Principal empregaram como base de dados a hidrografia em formato vetorial do Estado de Santa Catarina, com escala 1:50.000. A base de dados para o Estado de Santa Catarina foi obtida no Sistema de Informações Geográficas de Santa Catarina – SIGSC³.

² A ASF é uma instalação de processamento de dados e estação terrestre de rastreamento de satélites que opera dentro do Instituto de Geofísica da Universidade de Fairbanks, no Alasca. A plataforma pode ser acessada a partir do endereço eletrônico: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>

³ O SIGSC é uma ferramenta online para acesso público à dados geográficos do Estado de Santa Catarina de alta precisão, incluindo ortofotomosaicos coloridos e infravermelhos, modelos digitais altimétricos, entre outros. Esses dados podem ser acessados a partir do endereço eletrônico: <http://sigsc.sds.sc.gov.br/>

Nesse estudo a hierarquização fluvial dos canais das bacias hidrográficas seguiu a classificação definida por Strahler (1952, 1957).

O Coeficiente de Compacidade (Kc) é um número adimensional que descreve o nível de irregularidade da forma da bacia hidrográfica, sendo que quanto mais próximo da unidade for seu valor, mais circular é a bacia (VILLELA; MATTOS, 1975). Matematicamente, o coeficiente é definido como a relação entre o perímetro da bacia e de um círculo de área igual à da bacia, sendo calculado por:

$$Kc = 0,28 \cdot \frac{Pe}{\sqrt{Ab}} \quad (31)$$

onde, Kc é o Coeficiente de Compacidade; Pe é o Perímetro da Bacia (km); Ab é a Área da Bacia (km²).

O Fator de Forma (Kf) é a relação entre a largura média e o comprimento axial da bacia, que é o comprimento do exutório ao ponto mais longínquo do rio principal (VILLELA; MATTOS, 1975). Esse coeficiente é capaz de indicar a propensão da bacia hidrográfica à ocorrência de inundação. Uma bacia com baixo valor de Fator de Forma indica baixa suscetibilidade à inundação, enquanto outra bacia, de mesmo tamanho, mas com alto valor de Fator de Forma indica alta suscetibilidade à inundação. O coeficiente é calculado a partir da equação:

$$Kf = \frac{Ab}{Lx^2} \quad (32)$$

onde, Kf é o Fator de Forma; Ab é a Área da Bacia (km²); Lx é o comprimento axial da bacia (km).

O Índice de Circularidade (Ic) é outro coeficiente que descreve a forma da bacia hidrográfica. Seu valor tende para a unidade quando a bacia se aproxima da forma circular e diminui à medida que a forma torna-se alongada (TONELLO, 2005). O índice é calculado por:

$$Ic = 12,57 \cdot \frac{Ab}{Pe^2} \quad (33)$$

onde, Ic é o Índice de Circularidade; Ab é a Área da Bacia (km²); Pe é o Perímetro da Bacia em (km).

A Densidade de Drenagem (Dd) indica quão bem drenada é a bacia (VILLELA; MATTOS, 1975). O índice é calculado pela divisão entre o comprimento total dos cursos d'água pela área da bacia, conforme a equação:

$$Dd = \frac{Dr}{Ab} \quad (34)$$

onde, Dd é a Densidade de Drenagem; Dr é o comprimento total dos canais da bacia (km); Ab é a Área da Bacia (km²).

A Tabela 15 apresenta as métricas relacionadas à geologia da bacia hidrográfica.

Tabela 15 – Métricas relacionadas à geologia da bacia hidrográfica

No.	Símbolo	Definição	Unidade
17	<i>DCGMGLgno</i>	Unidade Geológico-Ambiental - Porção de Área de DCGMGLgno	%
18	<i>DCGR2salc</i>	Unidade Geológico-Ambiental - Porção de Área de DCGR2salc	%
19	<i>DSVMPasaf</i>	Unidade Geológico-Ambiental - Porção de Área de DSVMPasaf	%

Os índices relacionados à geologia foram obtidos com técnicas de geoprocessamento utilizando o software ArcGIS® ArcMap™ 10.3 a partir dos mapas de unidade geológico-ambiental apresentados no APÊNDICE B e APÊNDICE G. Esses mapas foram elaborados com dados extraídos do Mapa de Geodiversidade do Estado de Santa Catarina (CPRM, 2010), cuja escala é de 1:500.000.

A Tabela 16 apresenta as métricas relacionadas às características hidrológicas do solo da bacia hidrográfica.

Tabela 16 – Métricas relacionadas às características do solo da bacia hidrográfica

No.	Símbolo	Definição	Unidade
20	<i>Ghb</i>	Grupo Hidrológico – Porção de Área de Classe B	%
21	<i>Ghc</i>	Grupo Hidrológico – Porção de Área de Classe C	%
22	<i>Ghd</i>	Grupo Hidrológico – Porção de Área de Classe D	%

Os índices referentes às características do solo foram obtidos com técnicas de geoprocessamento utilizando o software ArcGIS® ArcMap™ 10.3 a partir dos mapas de tipos de solo das bacias apresentados no APÊNDICE C e APÊNDICE H.

Nos mapas de tipos de solo das bacias os solos são classificados por ordem conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (SANTOS et al., 2013). A base vetorial utilizada para elaborar os mapas de solo é proveniente do Projeto Inventário Florístico Florestal de Santa Catarina – IFFSC⁴, cuja escala é 1:250.000 (POTTER et al., 2004). Os mapas de tipos de solo assim como a classificação hidrológica de solos brasileiros apresentada na Tabela 17 foram utilizados como base para a definição dos grupos hidrológicos presentes nas bacias hidrográficas. Os mapas de grupos hidrológicos de solo da bacia do Rio Cunha e das bacias RB01, RB10 e RB11 são apresentados no APÊNDICE D e APÊNDICE I, respectivamente.

⁴ O Projeto IFFSC é uma iniciativa do governo estadual com objetivo de inventariar os remanescentes florestais do estado e gerar uma base de dados sólida para desenvolver a política florestal para Santa Catarina. Disponível em:

http://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=1172&Itemid=543

Tabela 17 – Classificação hidrológica de solos brasileiros

Grupo Hidrológico	Descrição	Tipos de Solo Enquadrados no Grupo
A	Compreende os solos com baixo potencial de escoamento e alta taxa de infiltração uniforme quando completamente molhados, consistindo principalmente de areias ou cascalhos, ambos profundos e excessivamente drenados. Taxa mínima de infiltração: > 7,62 mm/h.	LATOSSOLO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, LATOSSOLO VERMELHO, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade; LATOSSOLO AMARELO E LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso.
B	Compreende os solos contendo moderada taxa de infiltração quando completamente molhados, consistindo principalmente de solos moderadamente profundos a profundos, moderadamente a bem drenados, com textura moderadamente fina a moderadamente grossa. Taxa mínima de infiltração: 3,81-7,62 mm/h.	LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; LATOSSOLO BRUNO; NITOSSOLO VERMELHO; NEOSSOLO QUARTZARÊNICO; ARGISSOLO VERMELHO ou VERMELHO AMARELO de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.
C	Compreende os solos contendo baixa taxa de infiltração quando completamente molhados, principalmente com camadas que dificultam o movimento da água através das camadas superiores para as inferiores, ou com textura moderadamente fina e baixa taxa de infiltração. Taxa mínima de infiltração: 1,27-3,81 mm/h.	ARGISSOLO pouco profundo, mas não apresentando mudança textural abrupta ou ARGISSOLO VERMELHO, ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos profundos e apresentando mudança textural abrupta; CAMBISSOLO de textura média e CAMBISSOLO HÁPLICO ou HÚMICO, mas com características físicas semelhantes aos LATOSSOLOS (latossólico); ESPODOSSOLO FERROCÁRBICO; NEOSSOLO FLÚVICO.
D	Compreende os solos que possuem alto potencial de escoamento, tendo uma taxa de infiltração muito baixa quando completamente molhados, principalmente solos argilosos com alto potencial de expansão. Pertencem a este grupo, solos com grande permanência de lençol freático elevado, solos com argila dura ou camadas de argila próxima da superfície e solos expansivos agindo como materiais impermeabilizantes próximos da superfície. Taxa mínima de infiltração: < 1,27 mm/h.	NEOSSOLO LITÓLICO; ORGANOSSOLO; GLEISSOLO; CHERNOSSOLO; PLANOSSOLO; VERTISSOLO; ALISSOLO; LUVISSOLO; PLINTOSSOLO; SOLOS DE MANGUE; AFLORAMENTOS DE ROCHA; Demais CAMBISSOLOS que não se enquadram no Grupo C; ARGISSOLO VERMELHO AMARELO e ARGISSOLO AMARELO, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.

Fonte: Adaptado de Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005).

A Tabela 18 apresenta as métricas relacionadas ao uso do solo da bacia hidrográfica.

Tabela 18 – Métricas relacionadas ao uso do solo da bacia hidrográfica

No.	Símbolo	Definição	Unidade
23	<i>Usf</i>	Porção de Área de Floresta Nativa	%
24	<i>Usr</i>	Porção de Área de Reflorestamento	%
25	<i>Uss</i>	Porção de Área de Solo Exposto	%
26	<i>Usp</i>	Porção de Área de Pastagem	%
27	<i>Use</i>	Porção de Área de Edificação	%
28	<i>Usa</i>	Porção de Área de Agricultura	%

Os mapas de uso do solo foram obtidos com técnicas de geoprocessamento utilizando o software ArcGIS® ArcMap™ 10.3. Para elaboração do mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do Rio Cunha (APÊNDICE E) foi utilizado como base os dados de Michel (2013). Para elaboração do mapa de uso e ocupação do solo das bacias RB01, RB10 e RB11 (APÊNDICE J) foi utilizado como base os dados de Cardoso (2013) e Grison (2013).

As condições de umidade da bacia são determinantes para o comportamento do escoamento. Conforme Raghunath (2006), se há uma sucessão de eventos de precipitação, o escoamento aumenta devido à umidade inicial do solo proveniente da precipitação antecedente. Da mesma forma, eventos de precipitação podem ser determinantes para a produção de sedimentos no sentido de mobilizar sedimentos sobre a superfície da bacia e torná-los disponíveis para transporte em eventos subsequentes.

A Tabela 19 apresenta as métricas relacionadas à fatores climático-hidrológicos da bacia hidrográfica envolvendo precipitação.

Tabela 19 – Métricas relacionadas à fatores climático-hidrológicos da bacia hidrográfica

No.	Símbolo	Definição	Unidade
29	<i>Ipa(1)</i>	Índice de Precipitação Antecedente – 1 Dia	mm.dia ⁻¹
30	<i>Ipa(2)</i>	Índice de Precipitação Antecedente – 2 Dias	mm.dia ⁻¹
31	<i>Ipa(3)</i>	Índice de Precipitação Antecedente – 3 Dias	mm.dia ⁻¹
32	<i>Ipa(4)</i>	Índice de Precipitação Antecedente – 4 Dias	mm.dia ⁻¹
33	<i>Ipa(5)</i>	Índice de Precipitação Antecedente – 5 Dias	mm.dia ⁻¹
34	<i>Ipa(6)</i>	Índice de Precipitação Antecedente – 6 Dias	mm.dia ⁻¹
35	<i>Ipa(7)</i>	Índice de Precipitação Antecedente – 7 Dias	mm.dia ⁻¹
36	<i>Ips(1)</i>	Índice de Precipitação para Sedimentos – 1 Evento	min ⁻¹
37	<i>Ips(2)</i>	Índice de Precipitação para Sedimentos – 2 Eventos	min ⁻¹

O Índice de Precipitação Antecedente representa as condições iniciais de umidade da bacia, nesse sentido a inclusão do índice é considerada para avaliar sua relação com o armazenamento inicial dos tanques do Tank Model. O Índice de Precipitação Antecedente utilizado foi o mesmo proposto por Cardoso (2013):

$$Ipa(t) = \sum_{i=1}^t V_i \left(\frac{1}{2} \right)^{i-1} \quad (35)$$

onde, $Ipa(t)$ é o Índice de Precipitação Antecedente (mm); t é o número de dias antecedentes utilizado no índice; V_i é a precipitação acumulada no dia i (mm).

A erosão laminar é resultante do processo de destacamento das partículas do solo devido ao impacto das gotas de chuva e do transporte das partículas pela lâmina de escoamento. A capacidade de transporte do escoamento é incrementada pelo impacto das gotas de chuva, pois torna as partículas de sedimento mais disponíveis ao transporte (FOSTER, 1982).

O Índice de Precipitação para Sedimentos foi elaborado considerando alguns pressupostos. O primeiro pressuposto é de que o destacamento de partículas do solo está associado à intensidade máxima da precipitação. O segundo pressuposto é de que o transporte de sedimentos está relacionado ao volume acumulado de precipitação.

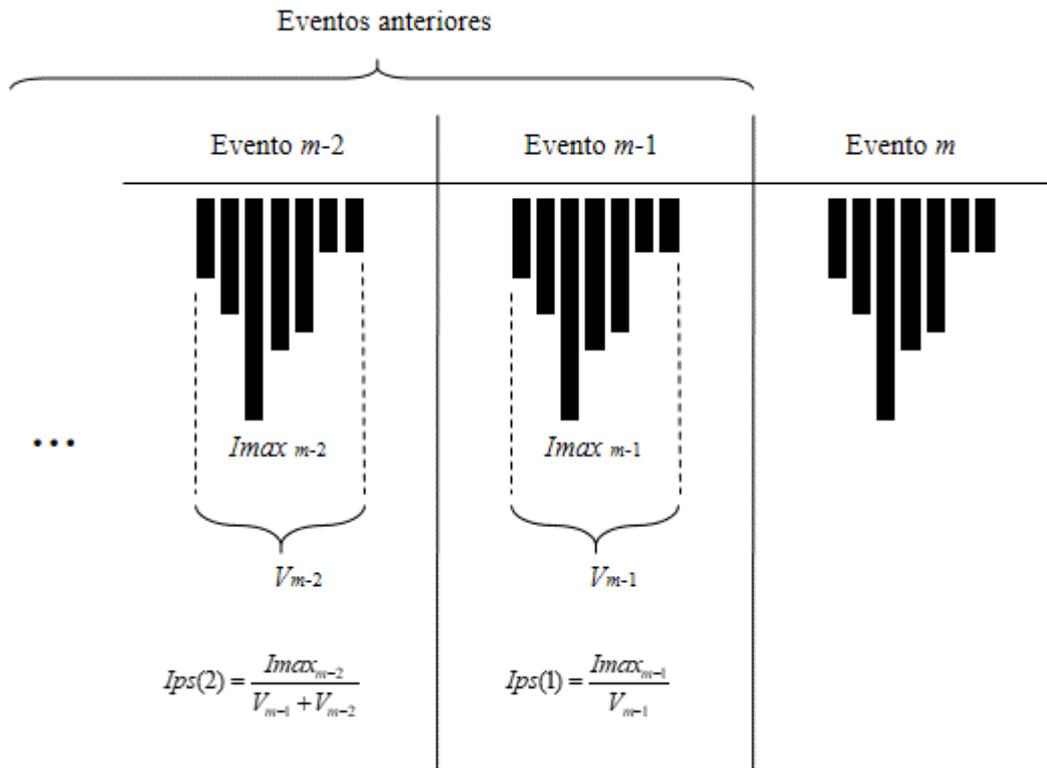
Considerando esses pressupostos, o índice foi estruturado para expressar a disponibilização de sedimentos dadas as características de eventos de precipitação antecedentes. Assume-se que a intensidade de precipitação é diretamente proporcional à disponibilização de sedimentos e o volume acumulado é inversamente proporcional à disponibilização de sedimentos. Assim, quanto maior a intensidade máxima do evento de precipitação antecedente maior a quantidade de sedimentos disponíveis e quanto maior o volume acumulado menor a quantidade de sedimentos disponíveis para transporte no evento posterior. O índice é expresso por:

$$Ips(n) = \frac{Imax_{m-n}}{\sum_{i=1}^n V_{m-i}} \quad \sum_{i=1}^n V_{m-i} \geq 1 \quad (36)$$

onde, $Ips(n)$ é o Índice de Precipitação para Sedimentos (min^{-1}); n é o número de eventos antecedentes utilizado no índice; $Imax_{m-n}$ é a intensidade máxima do evento antecedente $m-n$ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$); V_{m-i} é a precipitação acumulada no evento antecedente $m-i$ (mm).

O esquema conceitual da Figura 23 ajuda a entender o método proposto para o cálculo do Índice de Precipitação para Sedimentos.

Figura 23 – Esquema conceitual demonstrando o cálculo do Índice de Precipitação para Sedimentos



No esquema, o Índice de Precipitação para Sedimentos é utilizado para descrever a contribuição de eventos de precipitação antecedentes para a disponibilidade de sedimentos antes da ocorrência do Evento m . A contribuição de um determinado evento de precipitação antecedente (Evento $m-n$) para a disponibilização de sedimentos é calculada pela razão da intensidade máxima da precipitação do Evento $m-n$ pelo volume acumulado da precipitação proveniente do Evento $m-n$ mais a precipitação acumulada dos eventos posteriores até o Evento m . Assim, a contribuição do evento de precipitação imediatamente antecedente (Evento $m-1$) para a disponibilização de sedimentos é calculada pela razão da intensidade máxima da precipitação do Evento $m-1$ pelo volume acumulado da precipitação do Evento $m-1$. A contribuição do segundo evento de precipitação antecedente (Evento $m-2$) para a disponibilização de sedimentos é calculada pela divisão da intensidade máxima da precipitação do Evento $m-2$ pelo volume acumulado da precipitação proveniente do Evento $m-2$ mais a precipitação acumulada do evento posterior (Evento $m-1$).

4.12. Método de Regionalização

Antes de proceder a regionalização foi realizada a análise correlacional dos parâmetros do Tank Model e das características da bacia hidrográfica como forma de verificar a existência de relação linear entre variáveis e, se existente, o grau e direção da relação. A análise consistiu em calcular o Coeficiente de Correlação de Pearson (R) para os parâmetros do Tank Model e as características da bacia:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u}) \cdot (g_i - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^2}} \quad (37)$$

onde, R é a correlação entre variáveis; u_i e g_i são as variáveis da análise correlacional; \bar{u} e \bar{g} são os valores de média das variáveis da análise correlacional; e n é o número de variáveis.

O valor do coeficiente R varia na faixa de -1 a 1, indicando o grau e a direção (positiva ou negativa) da correlação entre duas variáveis. A Tabela 20 apresenta a interpretação dos valores do coeficiente em termos do grau e direção da correlação.

Tabela 20 – Classificação da correlação em grau e direção

Correlação	Interpretação
-0,90 a -1,00	Correlação negativa muito alta
-0,70 a -0,90	Correlação negativa alta
-0,50 a -0,70	Correlação negativa moderada
-0,30 a -0,50	Correlação negativa baixa
0,00 a -0,30	Correlação negativa desprezível
0,00 a 0,30	Correlação positiva desprezível
0,30 a 0,50	Correlação positiva baixa
0,50 a 0,70	Correlação positiva moderada
0,70 a 0,90	Correlação positiva alta
0,90 a 1,00	Correlação positiva muito alta

Fonte: Mukaka (2012).

Se R for positivo, o incremento do valor de uma variável gera um incremento na outra e, se R for negativo, o incremento do valor de uma variável gera um decréscimo na outra.

Os resultados da análise preliminar de correlação entre cada característica da bacia e os parâmetros do modelo foram observados para definir as características aptas para a etapa de regionalização do Tank Model. As características selecionadas foram aquelas que apresentaram correlação significativa ($|R| > 0,30$).

Após a análise preliminar de correlação foi realizada a regionalização do Tank Model. Pressupondo que os parâmetros otimizados do modelo podem ser explicados pelas características da bacia hidrográfica, a regionalização foi obtida por meio de regressão linear múltipla, onde os parâmetros otimizados foram considerados como variáveis dependentes e as características da bacia hidrográfica como variáveis independentes:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad n > (k + 1) \quad (38)$$

onde, $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}$ são as variáveis independentes que descrevem as características das bacias hidrográficas; $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ são os coeficientes da regressão; ε_i é a constante do modelo, uma

variável desconhecida que interfere na verdadeira relação linear; y_i é a variável dependente que descreve um determinado parâmetro otimizado do Tank Model.

Para cada parâmetro do Tank Model apresentado na Tabela 12 foi realizada a regressão linear múltipla tendo como variáveis independentes as características das bacias hidrográficas, apresentadas na Tabela 14, Tabela 15, Tabela 16, Tabela 18 e Tabela 19.

A regressão linear múltipla é aplicada por meio do Método dos Mínimos Quadrados, uma técnica de otimização matemática utilizado para encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados por meio da minimização da soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e valor observado. Nesta pesquisa, para aplicar esse procedimento sobre o conjunto de dados foi utilizado o software de métodos estatísticos TIBCO® Statistica™ 10.0. e a análise foi do tipo Forward Stepwise.

Após a aplicação da metodologia de regressão linear múltipla foi analisada a significância estatística da regressão por meio do teste para significância da regressão, também conhecido como “Teste F de significância global”. O teste é capaz de indicar se há uma relação linear entre a variável resposta (parâmetro otimizado do Tank Model) e algumas das variáveis regressoras (características das bacias hidrográficas) e assim é verificado se o modelo é adequado para estimar os parâmetros otimizados do Tank Model. Se o nível descritivo ou probabilidade de significância (valor-p) do teste F for menor do que um determinado nível de significância α adotado considera-se que há evidências estatísticas de que o modelo de regressão é adequado. Do contrário, caso o nível descritivo seja maior do que nível de significância, entende-se que o modelo não é capaz de fornecer uma estimativa satisfatória. Em geral, costuma-se adotar um nível de significância α de 5%, assim como foi utilizado nesse trabalho.

Se o modelo demonstrar significância estatística, o principal resultado da etapa de regionalização é a obtenção de uma equação matemática relacionando cada parâmetro otimizado do Tank Model às características da bacia hidrográfica.

Após a avaliação global do modelo de regressão e tendo verificada a sua adequabilidade, foi realizada a análise de significância estatística individual, para cada variável regressora.

O resultado da regressão linear múltipla também foi avaliado em termos do Coeficiente de Determinação (R^2), o qual é calculado pelo quadrado do Coeficiente de Correlação de Pearson (R).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados da pesquisa. De início é feita a descrição dos resultados da análise e tratamento de dados das séries de dados hidrossedimentológicos. Em seguida, são abordados os resultados da simulação do Tank Model para calibração e validação do escoamento e calibração da descarga de sedimentos. As soluções ótimas dos parâmetros do Tank Model são apresentadas, assim como os valores calculados para as métricas que descrevem as características das bacias. Posteriormente, é apresentada a análise preliminar de correlação entre os parâmetros do Tank Model e as características da bacia. Adiante, são exibidas as equações de regionalização dos parâmetros do Tank Model. E, por fim, é discorrido sobre as dificuldades e limitações encontradas durante o desenvolvimento da pesquisa.

5.1. Análise e tratamento de dados

A análise das séries de dados revelou a presença de descontinuidades nos registros. Cada descontinuidade gerou uma quebra da série contínua, assim as séries de dados iniciais foram divididas em séries contínuas individuais sem falhas. A Tabela 21 apresenta o resultado da reestruturação das séries de dados após a eliminação das descontinuidades.

Tabela 21 – Reestruturação das séries de dados após a eliminação das descontinuidades

Bacia	Série de Dados	Início	Término	Período por Série (dias)	Período por Bacia (dias)
Cunha	CUNHA_B1	18/01/2012	09/02/2012	22	494
	CUNHA_B2	15/02/2012	06/05/2012	81	
	CUNHA_B3	05/06/2012	30/07/2012	55	
	CUNHA_B4	02/08/2012	24/11/2012	114	
	CUNHA_B5	25/11/2012	23/06/2013	210	
	CUNHA_B6	27/06/2013	09/07/2013	12	
RB01	RB01	16/12/2011	05/11/2012	325	325
RB10	RB10_B1	16/12/2011	29/06/2012	196	294
	RB10_B2	17/07/2012	23/10/2012	98	
RB11	RB11_B1	16/12/2011	09/07/2012	206	305
	RB11_B2	16/07/2012	23/10/2012	99	

Foram identificados cinco pontos de descontinuidade na série de dados da bacia hidrográfica do Rio Cunha. Dessa forma, a série de dados foi dividida em seis partes. A série de dados da Bacia RB01 não apresentou descontinuidades. Já as bacias RB10 e RB11 apresentaram um ponto de descontinuidade cada e, portanto, ambas foram divididas em duas partes.

Após a eliminação das discontinuidades verifica-se que a bacia do Rio Cunha possui a maior quantidade de registros em dias (494), enquanto a bacia RB10 é a que possui menor quantidade de registros em dias (294).

A análise dos registros também revelou a presença de picos de CSS abruptos em alguns pontos da série de dados, sendo necessário removê-los.

Por meio da aplicação do algoritmo apresentado no APÊNDICE K foi possível separar as séries de dados em eventos hidrossedimentológicos. A Tabela 22 apresenta o número de eventos hidrossedimentológicos por série de dados e por bacia hidrográfica.

Tabela 22 – Número de eventos hidrossedimentológicos por série de dados e por bacia hidrográfica

Bacia	Série de Dados	Número de Eventos por Série	Número de Eventos por Bacia
Cunha	CUNHA_B1	6	101
	CUNHA_B2	17	
	CUNHA_B3	11	
	CUNHA_B4	19	
	CUNHA_B5	47	
	CUNHA_B6	1	
RB01	RB01	39	39
RB10	RB10_B1	43	57
	RB10_B2	14	
RB11	RB11_B1	30	41
	RB11_B2	11	

A bacia do Rio Cunha, além de possuir a maior quantidade de registros nas séries de dados, também apresenta a maior quantidade de eventos hidrossedimentológicos. A bacia RB01 é a que possui menor quantidade de eventos.

Após a separação das séries de dados em eventos hidrossedimentológicos particulares foi realizada a análise visual dos gráficos de cada. Os eventos que apresentaram precipitação considerável, assim como ascensão do hidrograma, pico e recessão bem definidos, foram selecionados para utilização nas etapas de calibração de escoamento, validação de escoamento e calibração de descarga de sedimentos.

Para a calibração do escoamento pelo Tank Model foram utilizados três eventos hidrossedimentológicos para cada bacia hidrográfica. A Tabela 23 apresenta os três eventos selecionados utilizados para cada bacia.

Tabela 23 – Eventos utilizados para calibração de escoamento pelo Tank Model

Bacia	Evento	Período	Duração (h)	Precipitação Acumulada (mm)
Cunha	(1)	24/01/2012 a 28/01/2012	88,33	58,40
	(2)	06/01/2013 a 07/01/2013	45,83	13,60
	(3)	19/01/2013 a 20/01/2013	17,00	25,20
RB01	(1)	24/12/2011 a 27/12/2011	65,33	41,32
	(2)	13/01/2012 a 17/01/2012	93,83	50,23
	(3)	26/07/2012 a 29/07/2012	65,50	80,82
RB10	(1)	13/01/2012 a 16/01/2012	59,50	46,50
	(2)	28/04/2012 a 29/04/2012	32,00	47,26
	(3)	26/07/2012 a 28/07/2012	45,83	79,46
RB11	(1)	28/04/2012 a 30/04/2012	41,00	47,26
	(2)	17/06/2012 a 23/06/2012	144,67	53,58
	(3)	16/07/2012 a 19/07/2012	74,17	43,12

Para a validação de escoamento pelo Tank Model foram utilizados dois eventos hidrossedimentológicos para cada bacia hidrográfica. A Tabela 24 apresenta os dois eventos selecionados para cada bacia.

Tabela 24 – Eventos utilizados para validação de escoamento pelo Tank Model

Bacia	Evento	Período	Duração (h)	Precipitação Acumulada (mm)
Cunha	(4)	26/07/2012 a 28/07/2012	40,50	64,00
	(5)	09/10/2012 a 13/10/2012	82,17	32,40
RB01	(4)	10/06/2012 a 13/06/2012	81,00	53,40
	(5)	17/06/2012 a 21/06/2012	96,67	47,26
RB10	(4)	10/06/2012 a 13/06/2012	84,83	39,97
	(5)	17/06/2012 a 20/06/2012	61,17	40,00
RB11	(4)	13/01/2012 a 19/01/2012	136,17	56,92
	(5)	10/06/2012 a 12/06/2012	43,50	39,49

Para a calibração de descarga de sedimentos pelo Tank Model foram utilizados dois eventos hidrossedimentológicos para cada bacia hidrográfica. A Tabela 25 apresenta os dois eventos selecionados para cada bacia.

Tabela 25 – Eventos utilizados para calibração de descarga de sedimentos pelo Tank Model

Bacia	Evento	Período	Duração (h)	Precipitação Acumulada (mm)
Cunha	(6)	24/04/2012 a 28/04/2012	79,67	75,00
	(7)	09/10/2012 a 13/10/2012	82,17	32,40
RB01	(6)	10/06/2012 a 13/06/2012	81,00	53,40
	(7)	17/06/2012 a 21/06/2012	96,67	47,26
RB10	(6)	17/06/2012 a 20/06/2012	61,17	40,00
	(7)	26/07/2012 a 28/07/2012	45,83	79,46
RB11	(6)	10/06/2012 a 12/06/2012	43,50	39,49
	(7)	17/06/2012 a 23/06/2012	144,67	53,58

Alguns eventos previamente utilizados para calibração ou validação de escoamento pelo Tank Model também foram selecionados para compor a calibração e simulação de descarga de sedimentos. Para a bacia do Rio Cunha, o evento (6) corresponde ao evento (5) utilizado para validação de escoamento. Para a bacia RB01, os eventos (6) e (7) correspondem aos eventos (4) e (5) utilizados para validação de escoamento, respectivamente. Para a bacia RB10, o evento (6) corresponde ao evento (5) utilizado para validação de escoamento e o evento (7) corresponde ao evento (3) utilizado para calibração de escoamento. Para a bacia RB11, o evento (7) corresponde ao evento (5) utilizado para validação de escoamento.

5.2. Resultados da calibração de escoamento

Os eventos hidrossedimentológicos apresentados na Tabela 23 foram utilizados para calibração dos parâmetros do Tank Model empregando o algoritmo NSGA-II. A Tabela 26 exibe o desempenho das funções-objetivo, o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (*NS*) e a Raiz Quadrada do Erro-Médio do Inverso da Predição (*RMSEI*), para a calibração de escoamento para as bacias do Rio Cunha, RB01, RB10 e RB11.

Verifica-se que os valores de *NS* variaram de 0,801 a 0,968. Sendo que todos os valores para esse coeficiente foram superiores a 0,75, indicando bom ajuste entre os valores simulados e observados de escoamento para os eventos hidrossedimentológicos utilizados para calibração dos parâmetros do Tank Model. Dado esses resultados, o modelo é classificado como adequado e bom. Os valores de *RMSEI* variaram de 26,08 a 1212,51. A literatura não define uma classificação ou padrão para os valores desta métrica, não sendo possível extrair conclusões a partir desse resultado. Apesar disso, considerando os valores de *NS* pode-se considerar os resultados da calibração de escoamento satisfatórios.

Tabela 26 – Desempenho das funções-objetivo *NS* e *RMSEI* para a calibração de escoamento dos parâmetros do Tank Model

Bacia	Evento	<i>NS</i>	<i>RMSEI</i>
Cunha	(1)	0,934	31,99
	(2)	0,922	26,08
	(3)	0,943	41,69
RB01	(1)	0,801	56,13
	(2)	0,900	153,84
	(3)	0,946	1212,51
RB10	(1)	0,926	58,53
	(2)	0,839	68,64
	(3)	0,855	44,50
RB11	(1)	0,939	61,23
	(2)	0,933	62,68
	(3)	0,968	43,79
Mínimo		0,801	26,08
Máximo		0,968	1212,51
Média		0,909	155,13

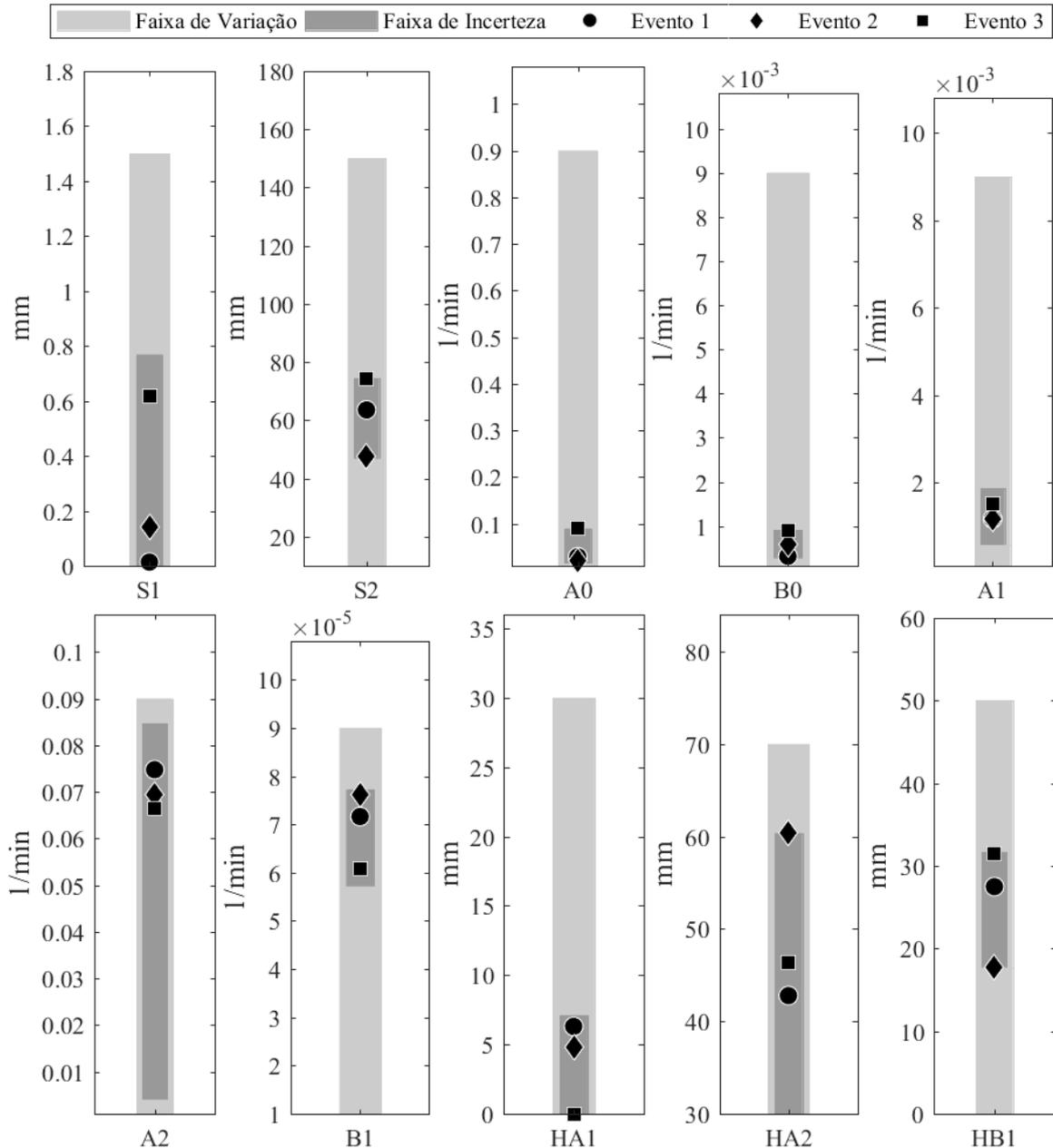
5.2.1. Resultados da calibração de escoamento para a bacia do Rio Cunha

A Figura 24 apresenta os resultados gerais da calibração do Tank Model para o escoamento de três eventos hidrossedimentológicos da bacia do Rio Cunha. Estão representadas as faixas de variação utilizadas no procedimento de calibração e as soluções ótimas encontradas para os parâmetros fundamentais ($A0$, $B0$, $A1$, $A2$, $B1$, $HA1$, $HA2$ e $HB1$) e para os parâmetros relacionados ao armazenamento inicial dos tanques ($S1$ e $S2$). Nos gráficos também estão representadas as faixas de incerteza, definidas a partir das soluções encontradas durante o procedimento de calibração dos parâmetros do Tank Model.

Após a calibração foi gerado um conjunto de 200 soluções que forneceram estimativas de escoamento para cada um dos três eventos utilizados nessa etapa. A melhor solução para cada evento hidrossedimentológico foi aquela que combinada com as demais soluções dos conjuntos forneceu o menor Coeficiente de Variação (CV) para os valores otimizados dos parâmetros fundamentais. Nos gráficos da figura cada ponto representa uma das melhores soluções.

A variabilidade das soluções ótimas encontradas para cada parâmetro do Tank Model foi relativamente baixa. A proximidade dos valores das soluções ótimas é desejável, pois confere maior confiança na definição do valor do parâmetro otimizado pela aplicação da mediana.

Figura 24 – Faixas de variação e incerteza e soluções ótimas da calibração de escoamento para a bacia do Rio Cunha por parâmetro do Tank Model



Destaca-se que a variabilidade dos parâmetros relacionados à altura inicial de armazenamento dos tanques (*S1* e *S2*) não foram considerados para o cálculo do CV, pois não representam realmente um parâmetro do modelo. Portanto, não é esperado que esses parâmetros apresentem valores de solução ótima próximos.

Para cada parâmetro do Tank Model foi determinada a mediana das três soluções ótimas encontradas. O resultado da mediana foi definido como o valor ótimo do parâmetro.

A Figura 25, Figura 26 e Figura 27, respectivamente, apresentam os gráficos dos resultados da calibração de escoamento para os eventos (1), (2) e (3) da bacia do Rio Cunha. Nos gráficos são exibidos o hidrograma observado, as estimativas (soluções) geradas a partir da simulação do Tank Model, assim como a estimativa definida como a melhor, aquela que

junto das demais soluções ótimas dos eventos fornecem o menor *CV*. São apresentados também o desempenho das funções-objetivo (*NS* e *RMSEI*) e a Fronteira de Pareto.

Figura 25 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (1) da bacia do Rio Cunha

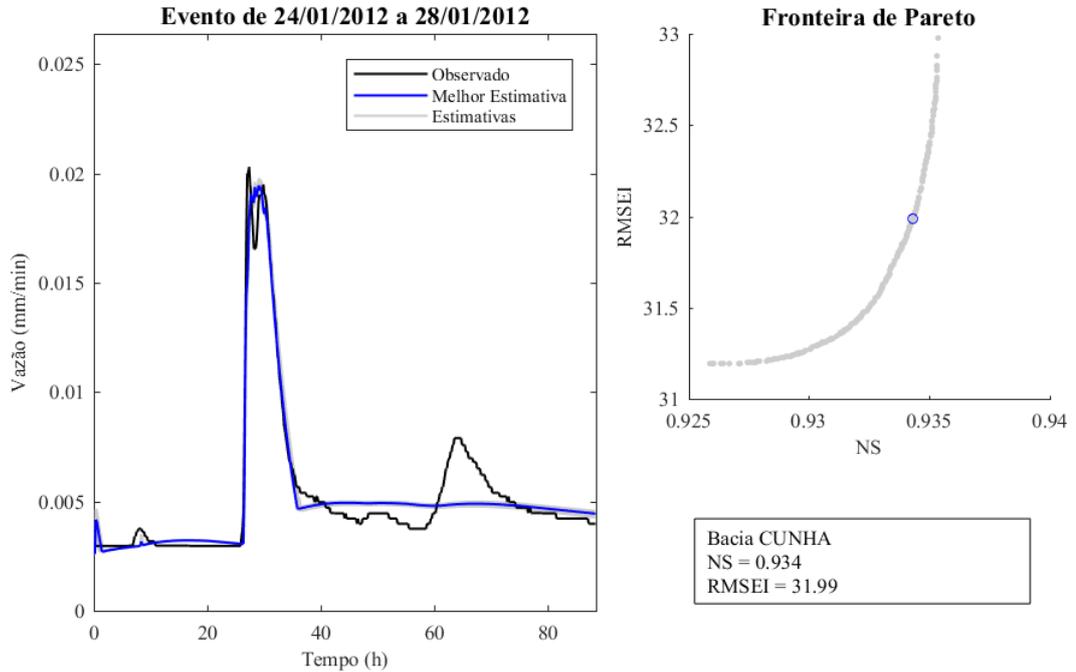


Figura 26 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (2) da bacia do Rio Cunha

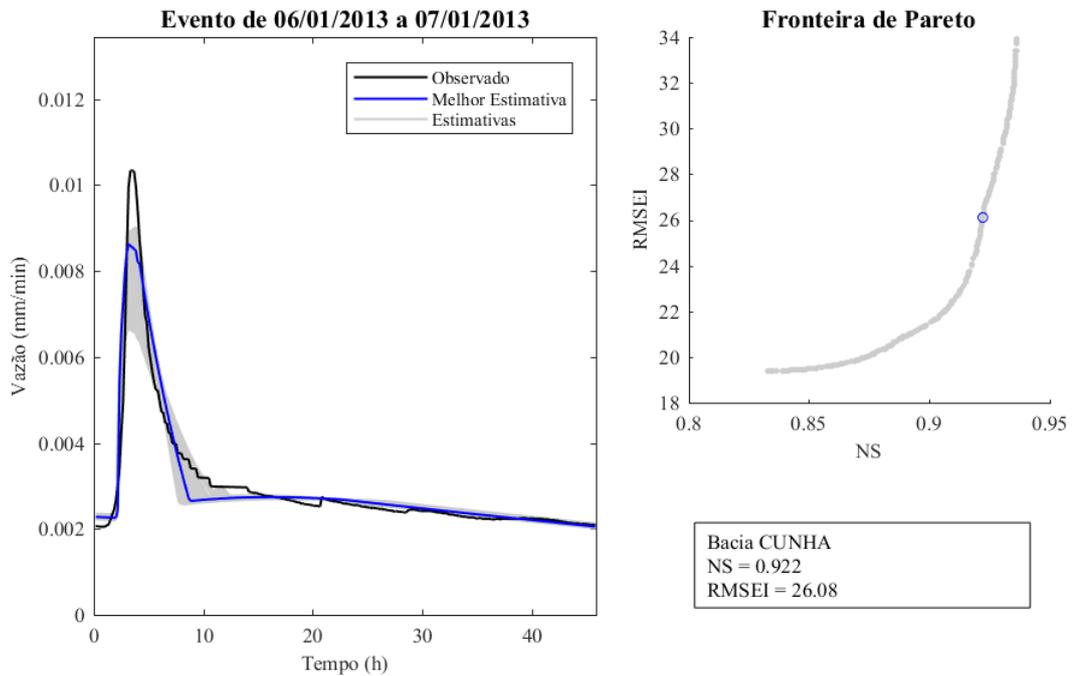
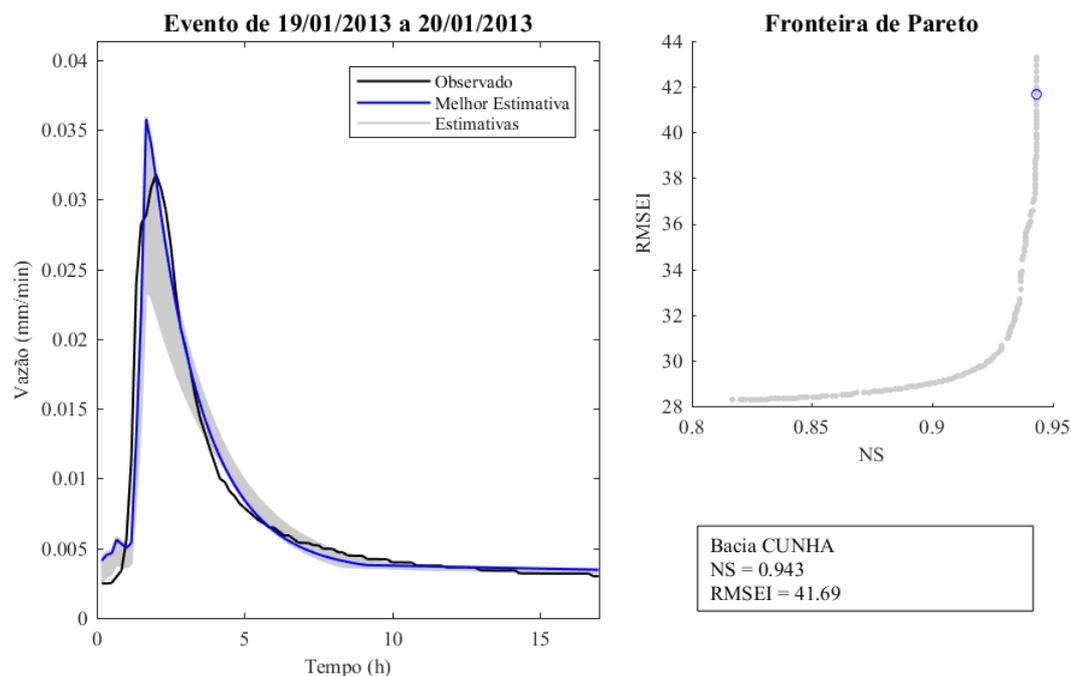


Figura 27 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (3) da bacia do Rio Cunha



Observando os gráficos do resultado de calibração de escoamento para a bacia do Rio Cunha verifica-se boa correspondência entre o hidrograma simulado e o hidrograma observado, tanto em termos da magnitude quanto do tempo do evento de escoamento.

Os picos do hidrograma também foram bem representados, principalmente nos eventos (2) e (3). O hidrograma observado do evento (1) apresenta um segundo pico, de menor magnitude, o qual não foi representado adequadamente pelo modelo. Isso pode ser explicado pela ocorrência de precipitação localizada não detectada pelo pluviômetro, caracterizando uma falha de monitoramento. Assim, a falha da simulação pode ser atribuída a um problema do conjunto de dados e não do modelo.

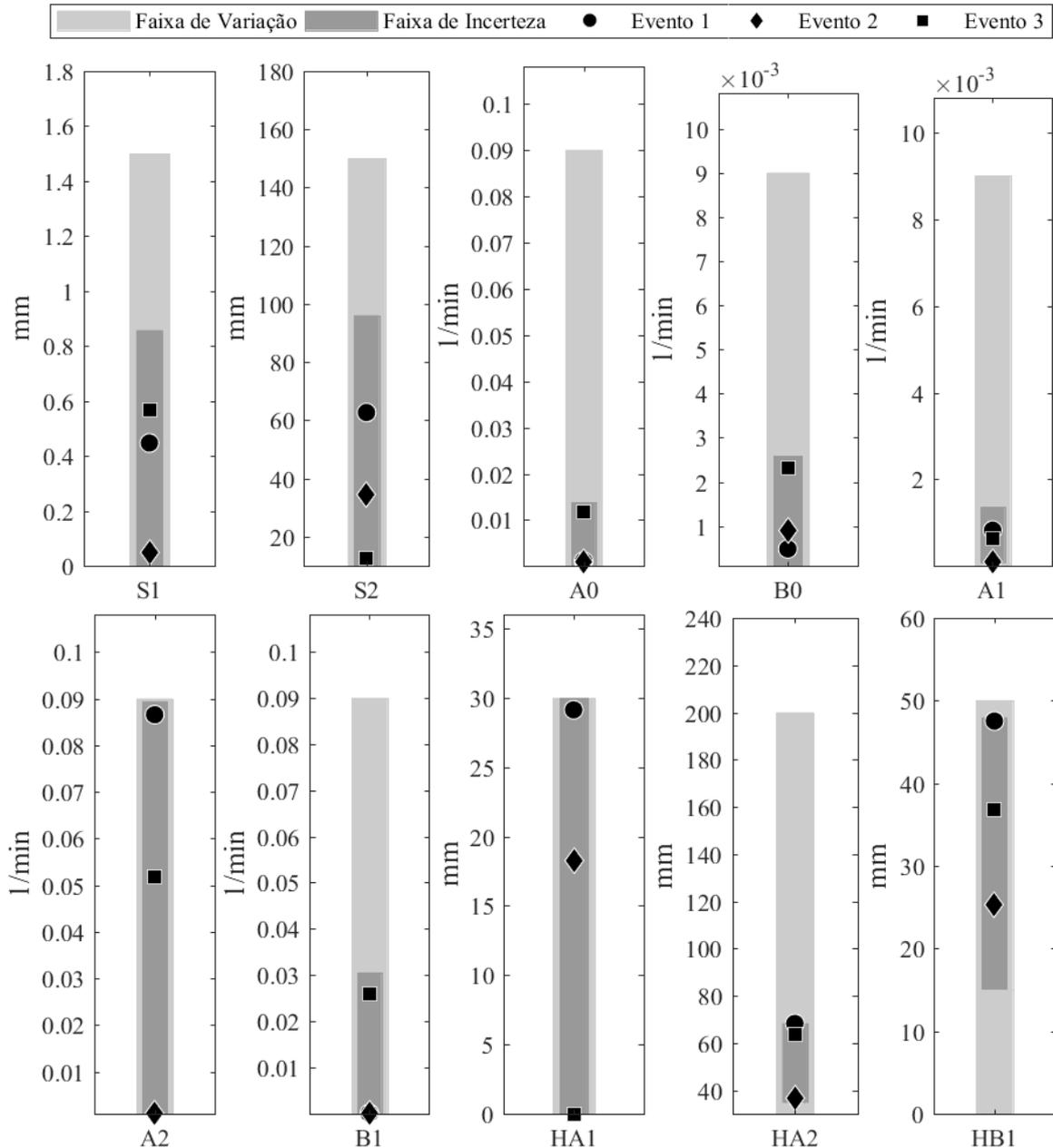
Os diagramas de Pareto indicam que o conjunto de soluções gerado pelo algoritmo foi bastante diverso, sem presença de nichos localizados, com a fronteira bem definida, formada por uma linha contínua.

5.2.2. Resultados da calibração de escoamento para a bacia RB01

A Figura 28 apresenta os resultados gerais da calibração do Tank Model para o escoamento de três eventos hidrossedimentológicos da bacia RB01. Estão representadas as faixas de variação utilizadas no procedimento de calibração e as soluções ótimas encontradas para os parâmetros fundamentais e para os parâmetros relacionados ao armazenamento inicial dos tanques. Nos gráficos da figura cada ponto representa uma solução ótima do parâmetro. Nos gráficos também estão representadas as faixas de incerteza, definidas a partir das soluções encontradas durante o procedimento de calibração dos parâmetros do Tank Model.

Verifica-se que a variabilidade das soluções ótimas foi relativamente baixa para a maioria dos parâmetros do Tank Model. Por outro lado, as soluções ótimas para os parâmetros *A2* e *HAI* apresentaram variabilidade expressiva dentro da faixa de variação.

Figura 28 – Faixas de variação e incerteza e soluções ótimas da calibração de escoamento para a bacia RB01 por parâmetro do Tank Model



A mediana das três soluções ótimas encontradas foi definida como o valor ótimo para cada parâmetro do Tank Model.

A Figura 29, Figura 30 e Figura 31, respectivamente, apresentam os gráficos dos resultados da calibração de escoamento para os eventos (1), (2) e (3) da bacia RB01. Nos gráficos são exibidos o hidrograma observado, as estimativas geradas a partir da simulação do Tank Model, assim como a estimativa definida como a melhor. São apresentados também o desempenho das funções-objetivo (*NS* e *RMSEI*) e a Fronteira de Pareto.

Figura 29 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (1) da bacia RB01

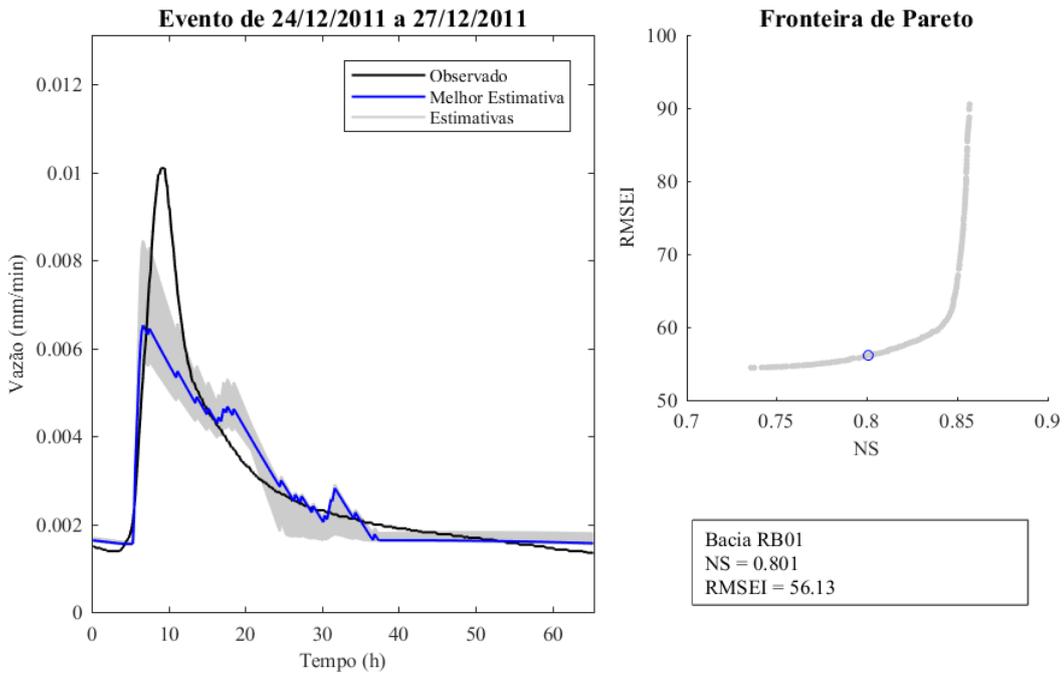


Figura 30 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (2) da bacia RB01

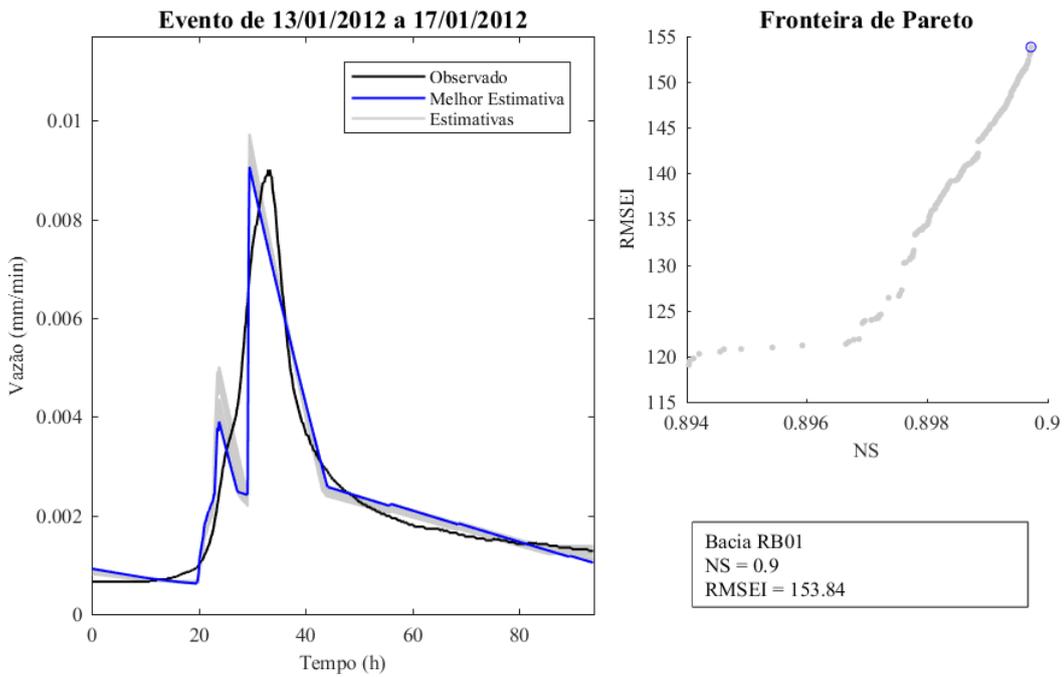
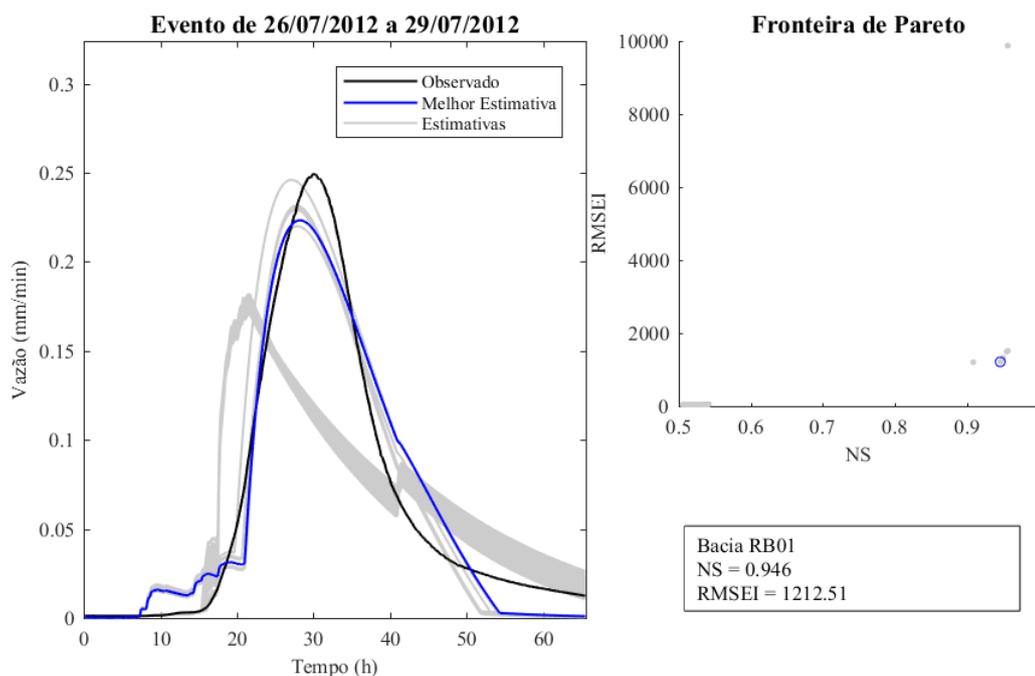


Figura 31 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (3) da bacia RB01



Os gráficos do resultado de calibração de escoamento para a bacia RB01 demonstram, em geral, correspondência satisfatória entre o hidrograma simulado e o hidrograma observado.

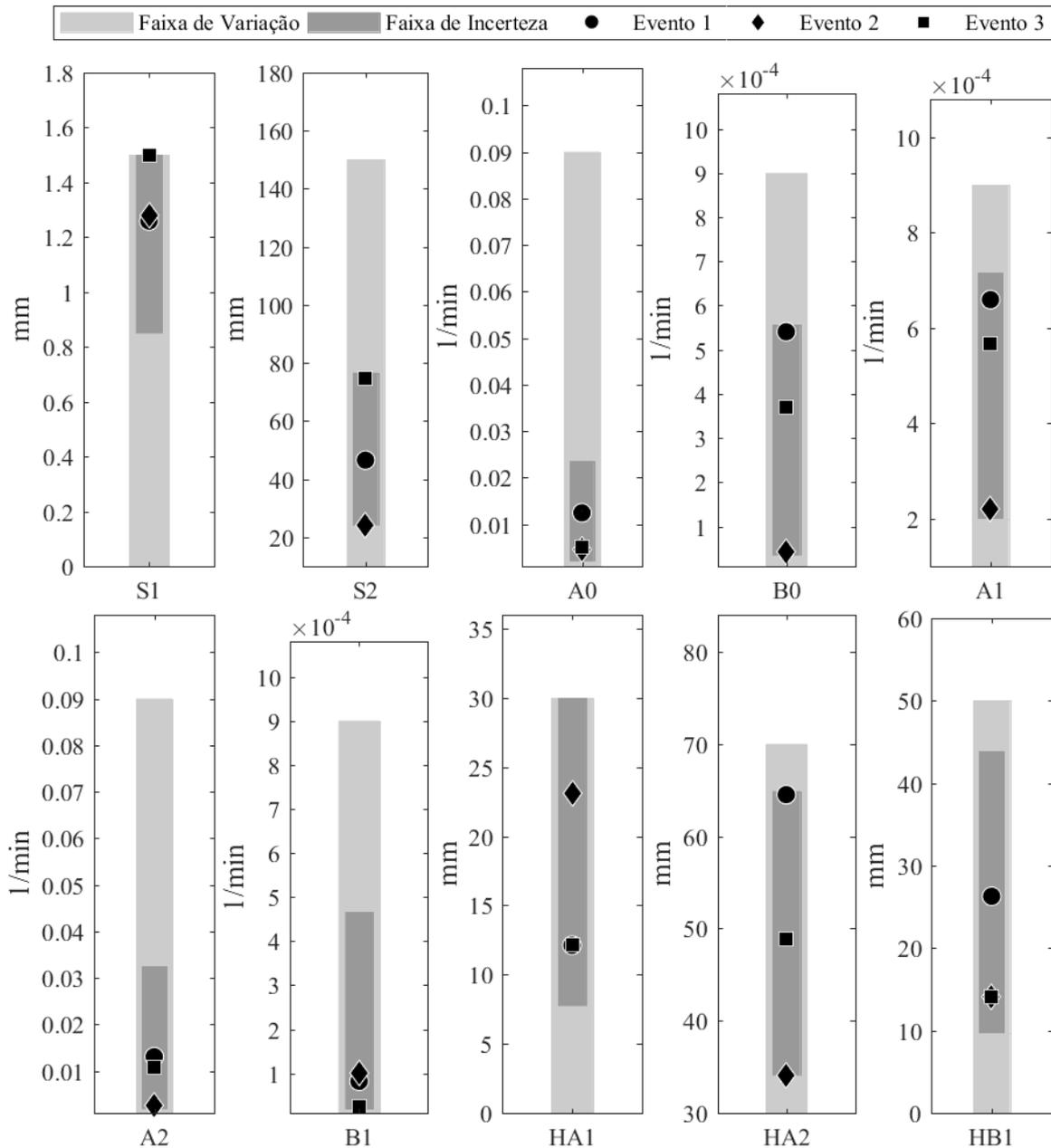
Contudo, nota-se que no evento (1) a magnitude do pico do hidrograma observado não foi bem representado pelo modelo. No evento (2) verifica-se boa concordância entre o escoamento simulado e o observado, porém a curva do hidrograma simulado não é suave na ascensão, onde ocorre a transição do escoamento de base para o escoamento superficial, e na recessão, onde ocorre a transição do escoamento superficial para o escoamento de base. No evento (3) a recessão do hidrograma não foi bem representada, sendo que os valores simulados foram subestimados.

Para os eventos (1) e (2) os diagramas de Pareto indicam que o conjunto de soluções gerada pelo algoritmo foi bastante diverso, sem presença de nichos localizados e com a fronteira bem definida. Entretanto, para o evento (3), o conjunto de soluções não foi tão diverso e a fronteira não é bem definida.

5.2.3. Resultados da calibração de escoamento para a bacia RB10

A Figura 32 apresenta os resultados gerais da calibração do Tank Model para o escoamento de três eventos hidrossedimentológicos da bacia RB10. Estão representadas as faixas de variação utilizadas no procedimento de calibração e as soluções ótimas encontradas para os parâmetros fundamentais e para os parâmetros relacionados ao armazenamento inicial dos tanques. Nos gráficos da figura cada ponto representa uma solução ótima do parâmetro. Nos gráficos também estão representadas as faixas de incerteza, definidas a partir das soluções encontradas durante o procedimento de calibração dos parâmetros do Tank Model.

Figura 32 – Faixas de variação e incerteza e soluções ótimas da calibração de escoamento para a bacia RB10 por parâmetro do Tank Model



Verifica-se que a variabilidade das soluções ótimas é satisfatória apenas para os parâmetros *A0*, *A2* e *B1*. Os parâmetros *B0*, *A1*, *HA1*, *HA2* e *HB1* apresentaram variabilidade considerável das soluções ótimas dentro da faixa de variação.

A mediana das três soluções ótimas encontradas foi definida como o valor otimizado para cada parâmetro do Tank Model.

A Figura 33, Figura 34 e Figura 35, respectivamente, apresentam os gráficos dos resultados da calibração de escoamento para os eventos (1), (2) e (3) da bacia RB10. Nos gráficos são exibidos o hidrograma observado, as estimativas geradas a partir da simulação do Tank Model, assim como a estimativa definida como a melhor. São apresentados também o desempenho das funções-objetivo (*NS* e *RMSEI*) e a Fronteira de Pareto.

Figura 33 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (1) da bacia RB10

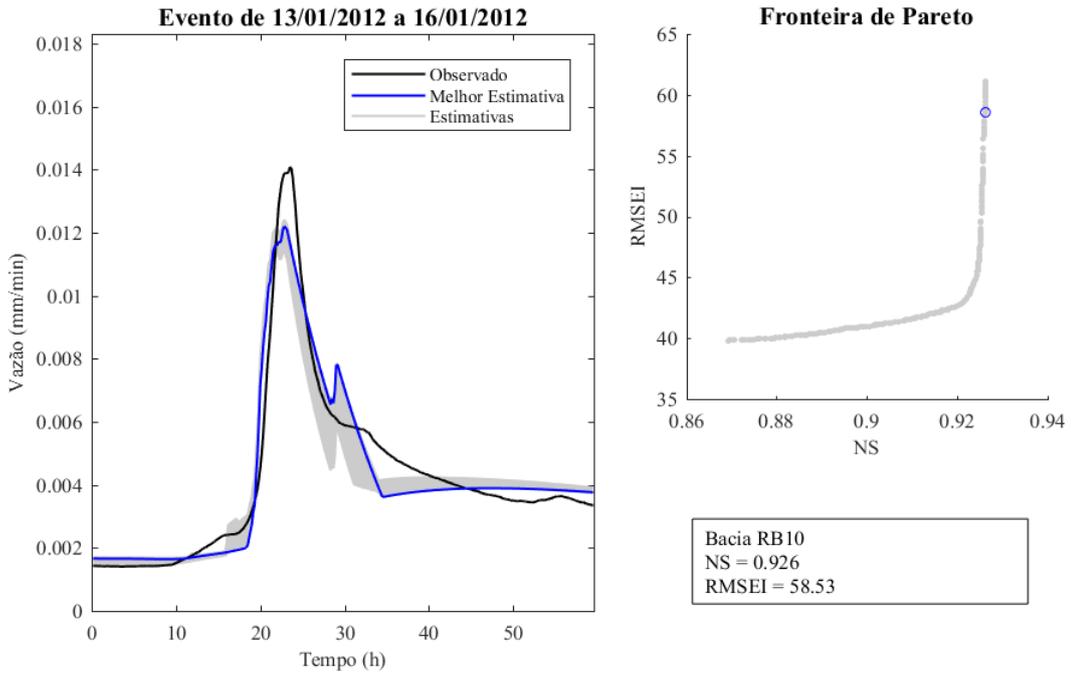


Figura 34 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (2) da bacia RB10

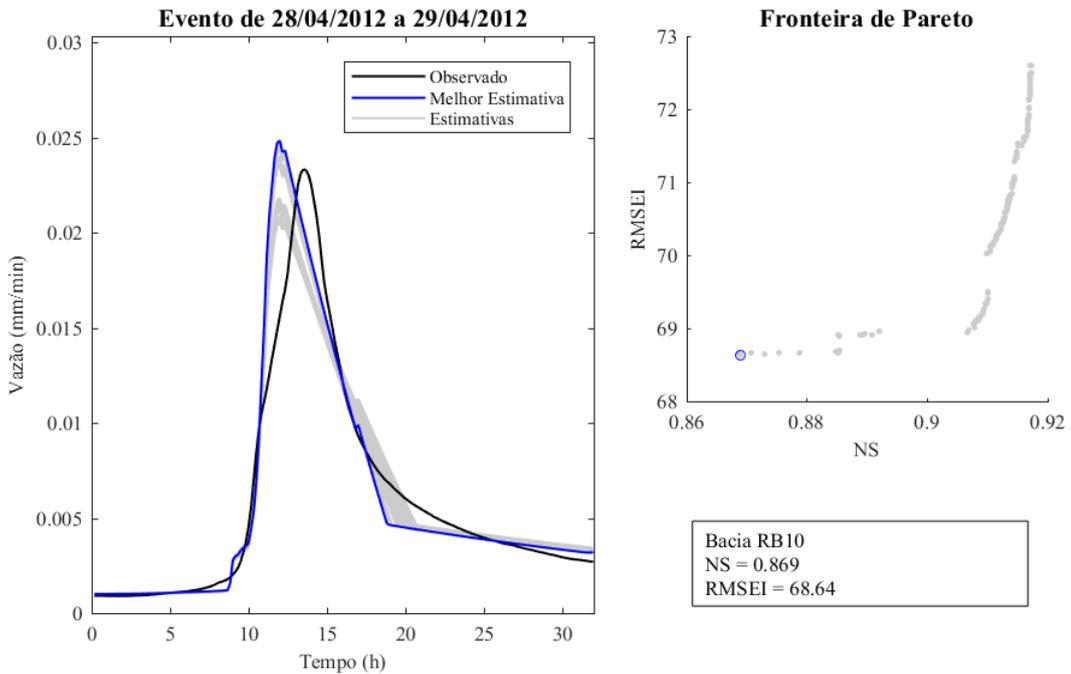
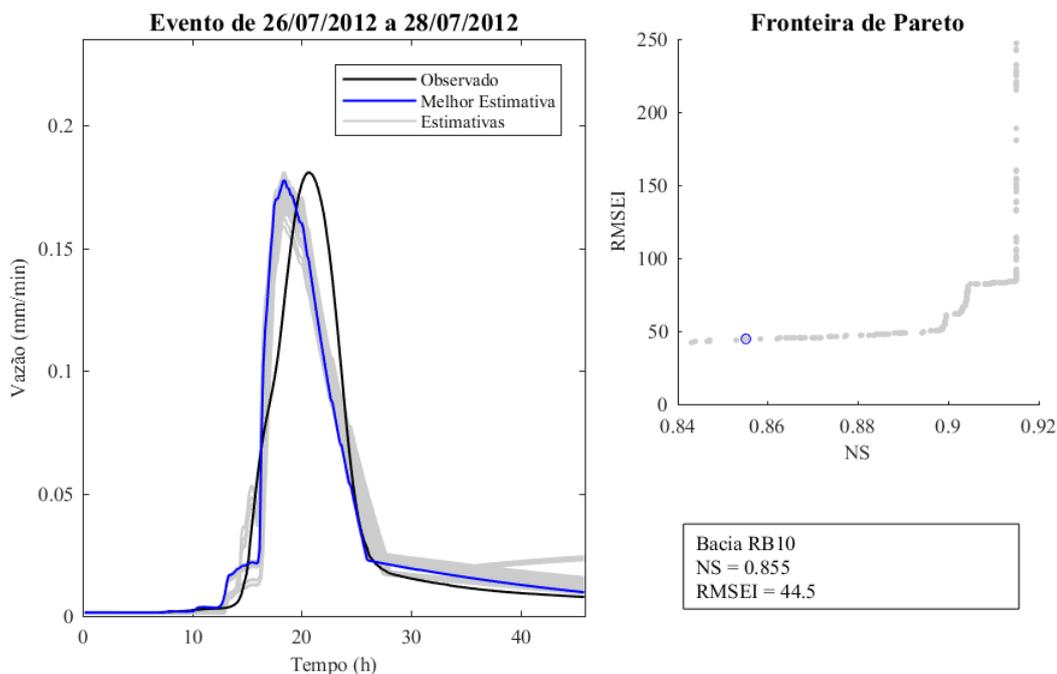


Figura 35 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (3) da bacia RB10



Os gráficos de resultados da calibração de escoamento para a bacia RB10 apresentam, em geral, boa correspondência entre o hidrograma simulado e o hidrograma observado, principalmente quanto à magnitude do escoamento.

Porém, nota-se que para todos os eventos as curvas dos hidrogramas simulados não são suaves na recessão, na transição do escoamento superficial para o escoamento de base. Além disso, observa-se que para os eventos (2) e (3) o pico do hidrograma estimado foi levemente adiantado pela simulação do modelo.

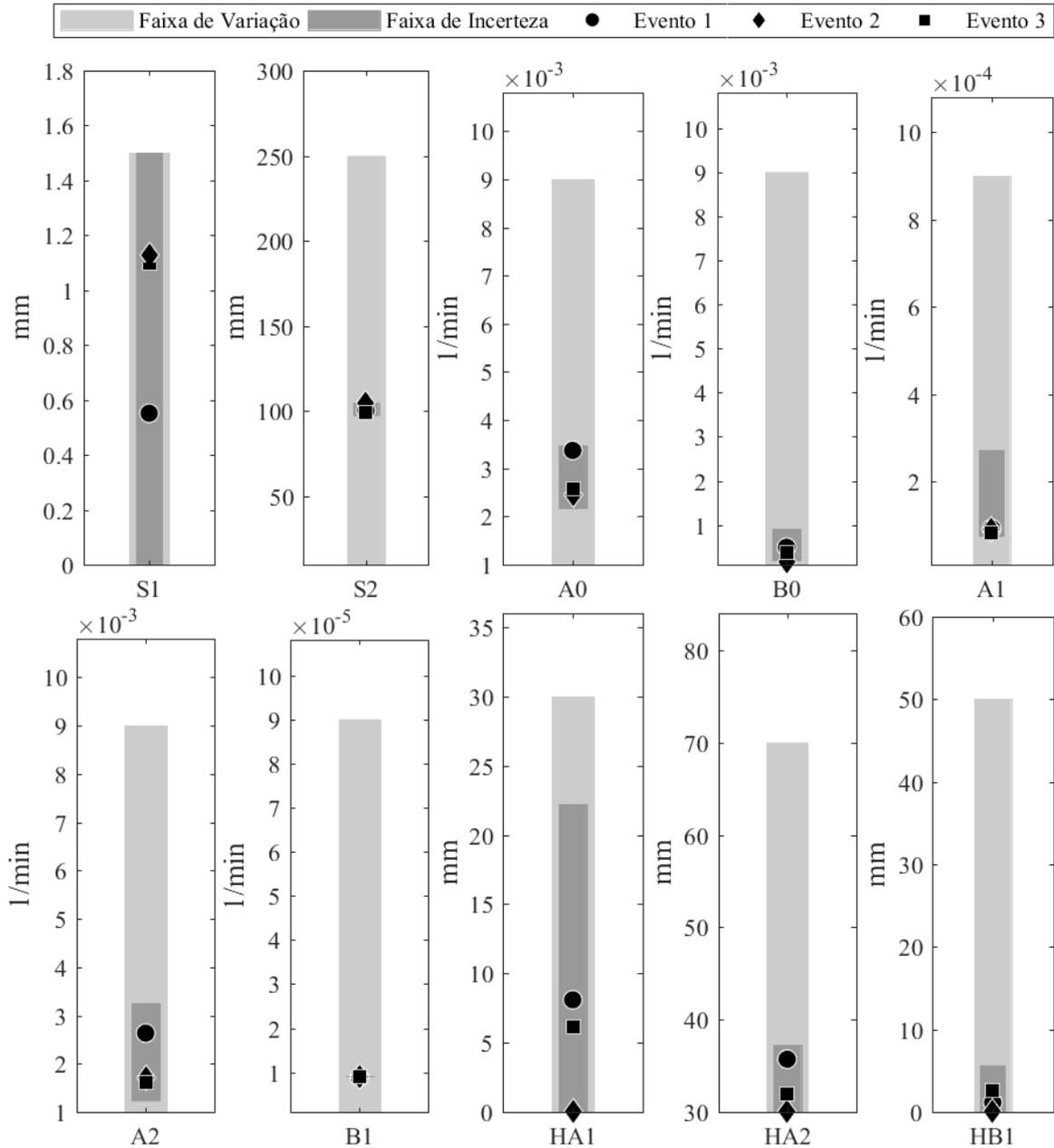
Os diagramas de Pareto indicam que o conjunto de soluções gerada pelo algoritmo foi bastante diverso, sem presença de nichos localizados, para todos os eventos. Para os eventos (1) e (3) a fronteira é bem definida, formando uma linha contínua. A fronteira de Pareto do evento (2), apesar de relativamente bem definida, apresenta descontinuidades, não formando uma linha contínua.

5.2.4. Resultados da calibração de escoamento para a bacia RB11

A Figura 36 apresenta os resultados gerais da calibração do Tank Model para o escoamento de três eventos hidrossedimentológicos da bacia RB11. Estão representadas as faixas de variação utilizadas no procedimento de calibração e as soluções ótimas encontradas para os parâmetros fundamentais e para os parâmetros relacionados ao armazenamento inicial dos tanques. Nos gráficos da figura cada ponto representa uma solução ótima do parâmetro. Nos gráficos também estão representadas as faixas de incerteza, definidas a partir das soluções encontradas durante o procedimento de calibração dos parâmetros do Tank Model.

Verifica-se que a variabilidade das soluções ótimas encontradas é satisfatória para praticamente todos os parâmetros do modelo. Os parâmetros $B0$, $A1$ e $B1$ apresentaram excelentes resultados, expresso pela baixa variabilidade das soluções ótimas.

Figura 36 – Faixas de variação e incerteza e soluções ótimas da calibração de escoamento para a bacia RB11 por parâmetro do Tank Model



Assim como procedido para as demais bacias, a mediana das três soluções ótimas encontradas foi definida como o valor otimizado para cada parâmetro do Tank Model.

Considerando o conjunto de gráficos de faixas de variação e soluções ótimas da calibração de escoamento para as bacias do Rio Cunha, RB01, RB10 e RB11, pode-se classificar como eficiente o método proposto para escolha da melhor solução para os parâmetros do Tank Model baseado no valor do CV.

A Figura 37, Figura 38 e Figura 39, respectivamente, apresentam os gráficos dos resultados da calibração de escoamento para os eventos (1), (2) e (3) da bacia RB11. Nos gráficos são exibidos o hidrograma observado, as estimativas geradas a partir da simulação do

Tank Model, assim como a estimativa definida como a melhor. São apresentados também o desempenho das funções-objetivo (*NS* e *RMSEI*) e a Fronteira de Pareto.

Figura 37 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (1) da bacia RB11

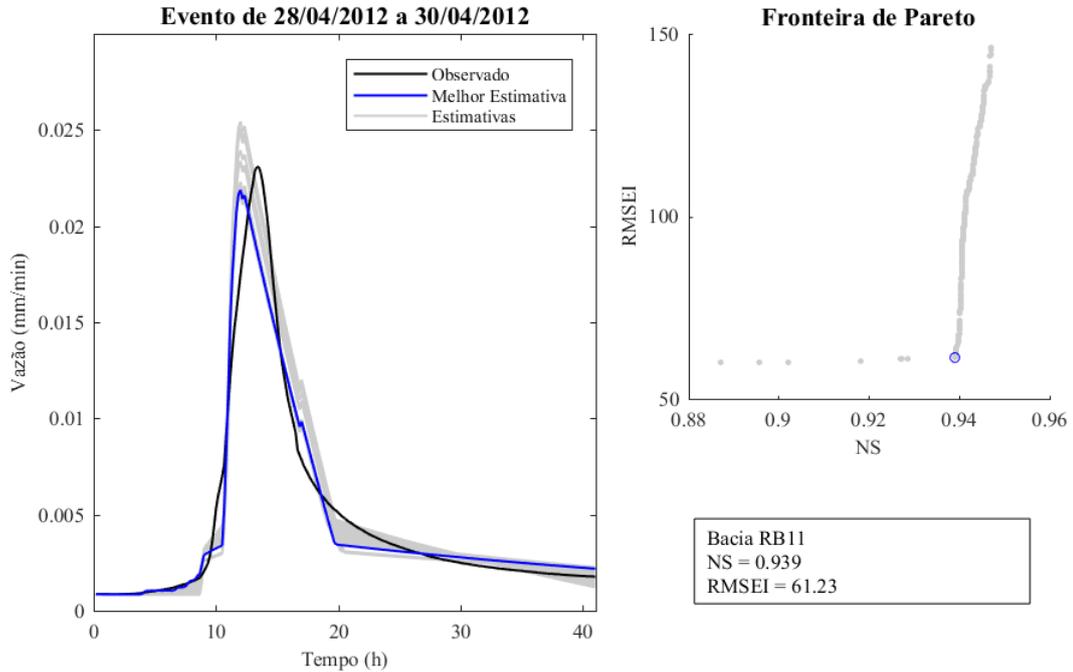


Figura 38 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (2) da bacia RB11

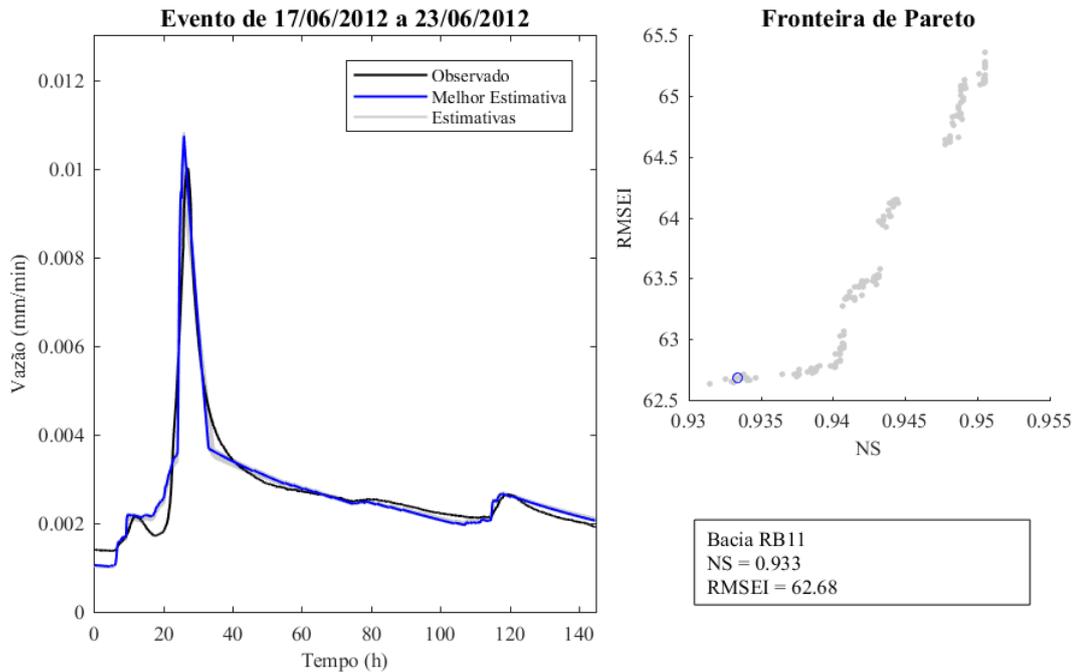
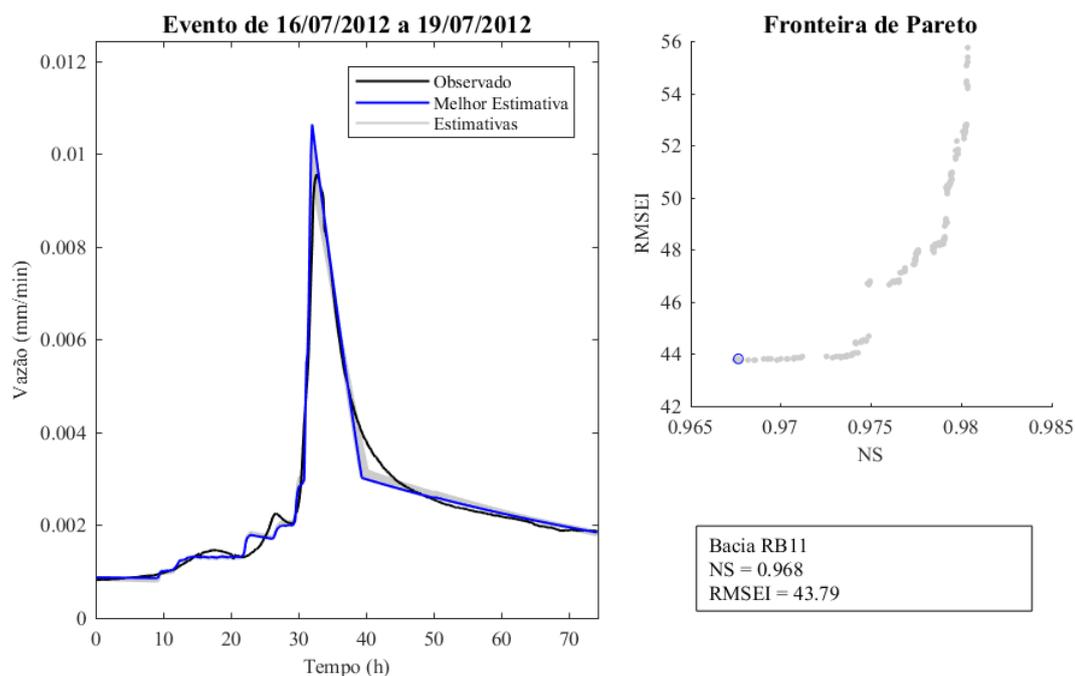


Figura 39 – Resultados da calibração de escoamento para o evento (3) da bacia RB11



Os gráficos de resultados da calibração de escoamento para a bacia RB11 apresentam, em geral, boa concordância entre o hidrograma simulado e o hidrograma observado, principalmente quanto à representação da magnitude do escoamento. Os picos dos hidrogramas observados foram bem representados em termos de magnitude e tempo do evento de escoamento.

Entretanto, para o evento (1), o pico do hidrograma estimado foi levemente adiantado pela simulação. Além disso, nota-se que para todos os eventos as curvas dos hidrogramas simulados não são suaves na transição do escoamento superficial para o escoamento de base.

Os diagramas de Pareto indicam que o conjunto de soluções gerada pelo algoritmo foi bastante diverso, sem presença de nichos localizados, para todos os eventos. Em todos os casos a fronteira é bem definida, mas para os eventos (2) e (3) a fronteira não é formada por uma linha contínua.

5.3. Resultados da validação de escoamento

Os resultados da calibração de escoamento foram utilizados para determinar os valores otimizados dos parâmetros do Tank Model para simulação de escoamento nas bacias. Os valores otimizados foram aplicados para a simulação de outros eventos, não utilizados na etapa de calibração. Em seguida, foi realizada a validação do Tank Model, onde a resposta do modelo foi comparada com dados numéricos de observações da realidade para avaliar se a simulação é capaz de representar de forma fiel o comportamento do escoamento. Os eventos hidrossedimentológicos apresentados na Tabela 24 foram utilizados para validação de escoamento do Tank Model.

Ressalta-se que antes de proceder a validação foi realizada a calibração dos parâmetros relacionados à altura inicial de armazenamento dos tanques (*S1* e *S2*) para determinar a condição inicial de umidade das bacias para cada evento hidrossedimentológico.

A Tabela 27 exhibe o desempenho das métricas, o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (*NS*), a Raiz Quadrada do Erro-Médio do Inverso da Predição (*RMSEI*), a Razão do Erro Médio Quadrático pelo Desvio Padrão dos Dados Observados (*RSR*) e o Bias Percentual (*PBIAS*), para a validação de escoamento para as bacias do Rio Cunha, RB01, RB10 e RB11.

Tabela 27 – Desempenho das métricas *NS*, *RMSEI*, *RSR* e *PBIAS* para a validação de escoamento do Tank Model

Bacia	Evento	<i>NS</i>	<i>RMSEI</i>	<i>RSR</i>	<i>PBIAS</i>
Cunha	(4)	0,767	88	0,482	1,87
	(5)	0,762	231	0,488	0,92
RB01	(4)	0,699	1219	0,548	-9,77
	(5)	0,602	142	0,630	-9,49
RB10	(4)	0,691	47	0,556	-6,24
	(5)	0,664	126	0,580	-8,34
RB11	(4)	0,808	58	0,438	-0,16
	(5)	0,869	49	0,363	9,66
Mínimo		0,602	47	0,363	-9,77
Máximo		0,869	1219	0,630	9,66
Média		0,733	245	0,511	-2,694

Verifica-se que os valores de *NS* variaram de 0,602 a 0,869. Tendo em vista que todos os valores para esse coeficiente estão incluídos dentro da faixa de 0,36 a 0,75 ou são superiores a 0,75, o modelo pode ser considerado satisfatório. Há um bom ajuste entre os valores simulados e observados de escoamento para os eventos hidrossedimentológicos utilizados para validação do Tank Model.

Os valores de *RSR* variaram de 0,363 a 0,630. Quanto a esse coeficiente o modelo pode ser classificado como satisfatório. Todos os valores de *RSR* ficaram abaixo de 0,70, indicando bom desempenho da simulação do modelo.

Os valores de *PBIAS* variaram de -9,77 a 9,66%. Quanto a esse coeficiente o modelo também pode ser classificado como satisfatório. Todos os valores de *PBIAS* em termos absolutos ficaram abaixo de 25%, indicando bom desempenho da simulação do modelo. Verifica-se que para alguns eventos, tal como o evento (5) da bacia RB11, o escoamento foi subestimado pela simulação e para outros, como o evento (4) da bacia RB01, o escoamento foi superestimado.

Tendo em vista que a literatura não define uma classificação ou padrão para os valores *RMSEI*, a qualidade da validação não pode ser avaliada por esse coeficiente, mas considerando os resultados de *NS*, *RSR* e *PBIAS* o modelo é classificado como válido e adequado para simulação do escoamento.

5.3.1. Resultados da validação de escoamento para a bacia do Rio Cunha

A Figura 40 e a Figura 41, respectivamente, apresentam os gráficos dos resultados da calibração de escoamento para os eventos (4) e (5) da bacia do Rio Cunha. Nos gráficos são exibidos o hidrograma observado e as estimativas geradas a partir da simulação do Tank Model aplicando os valores otimizados dos parâmetros do modelo. São apresentados também o desempenho das métricas *NS*, *RMSEI*, *RSR* e *PBIAS*, e a Fronteira de Pareto.

Figura 40 – Resultados da validação de escoamento para o evento (4) da bacia do Rio Cunha

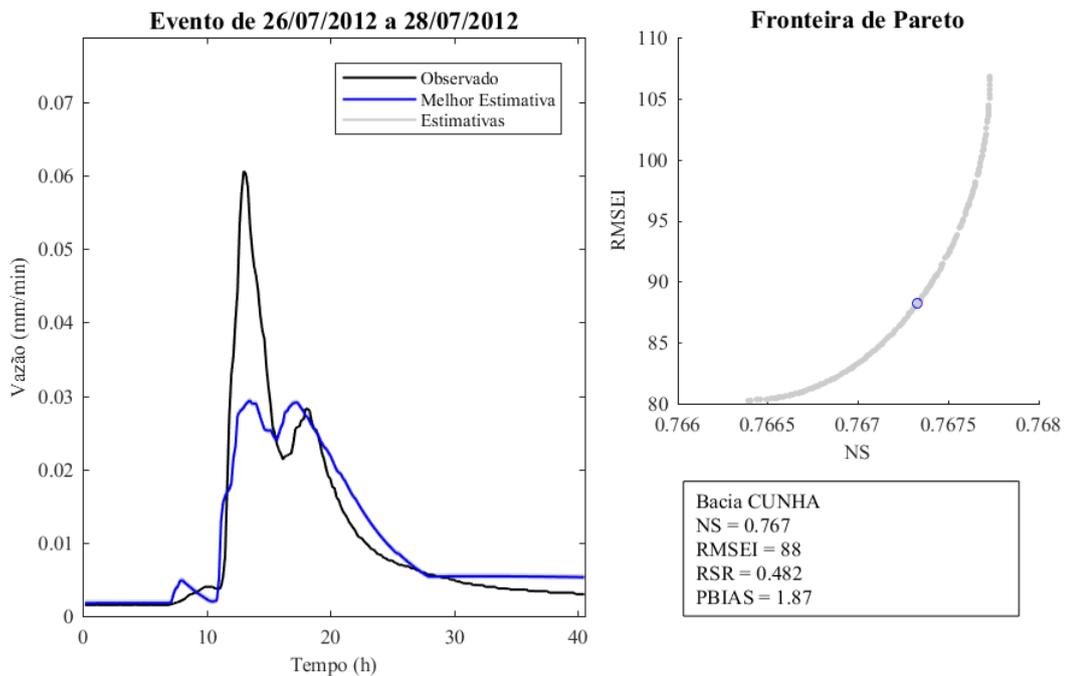
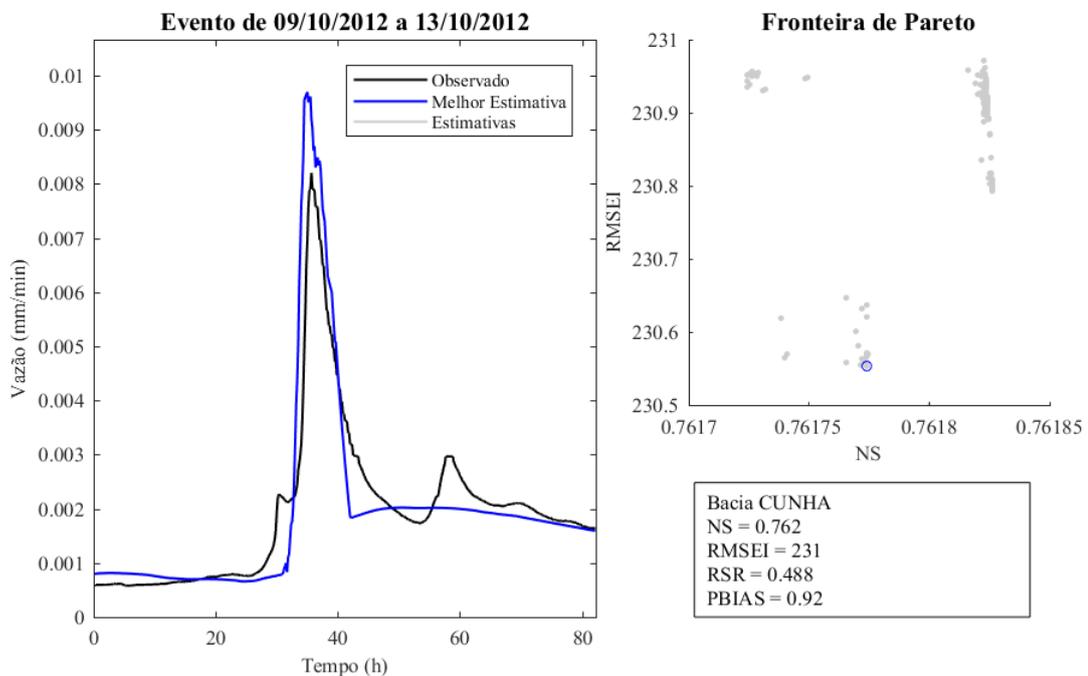


Figura 41 – Resultados da validação de escoamento para o evento (5) da bacia do Rio Cunha



Para cada evento hidrossedimentológico, a calibração dos parâmetros $S1$ e $S2$ gerou um conjunto de 200 soluções que forneceram as melhores estimativas de escoamento. Na etapa de validação, a melhor estimativa foi definida como sendo aquela que apresentou a menor distância euclidiana do ponto da fronteira de Pareto até o ponto ideal para as métricas NS e $RMSEI$ normalizadas.

Os gráficos de resultados da validação de escoamento para a bacia do Rio Cunha apresentam concordância satisfatória entre o hidrograma simulado e o hidrograma observado.

Entretanto, o modelo não foi capaz de representar bem a magnitude do primeiro pico do hidrograma observado do evento (4), o qual apresenta dois picos de magnitude considerável. Para o evento (5) o modelo superestimou o pico do hidrograma e a curva não apresentou suavidade na transição do escoamento superficial para o escoamento de base.

O diagrama de Pareto do evento (4) indica que o conjunto de soluções gerada pelo algoritmo foi bastante diverso, sem presença de nichos localizados, com fronteira bem definida e descrita por uma linha contínua. Por outro lado, para o evento (5), apesar do diagrama apresentar um conjunto relativamente heterogêneo de soluções, a fronteira de Pareto não é bem definida.

5.3.2. Resultados da validação de escoamento para a bacia RB01

A Figura 42 e a Figura 43, respectivamente, apresentam os gráficos dos resultados da calibração de escoamento para os eventos (4) e (5) da bacia RB01. Nos gráficos são exibidos o hidrograma observado e as estimativas geradas a partir da simulação do Tank Model aplicando os valores otimizados dos parâmetros do modelo. São apresentados também o desempenho das métricas NS , $RMSEI$, RSR e $PBIAS$, e a Fronteira de Pareto.

Figura 42 – Resultados da validação de escoamento para o evento (4) da bacia RB01

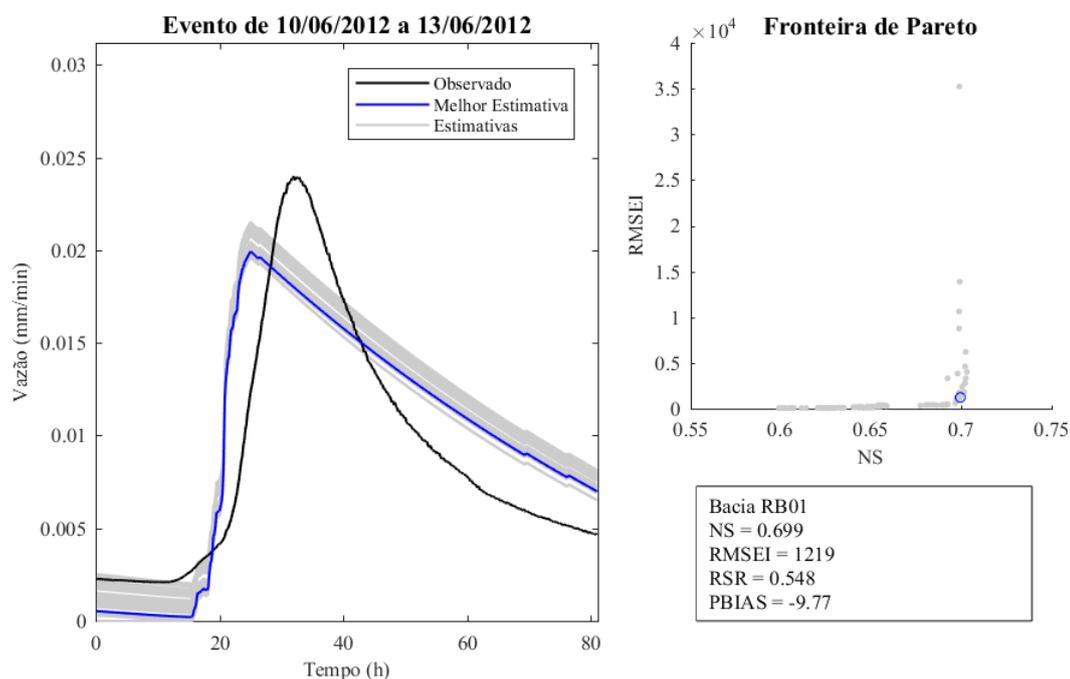
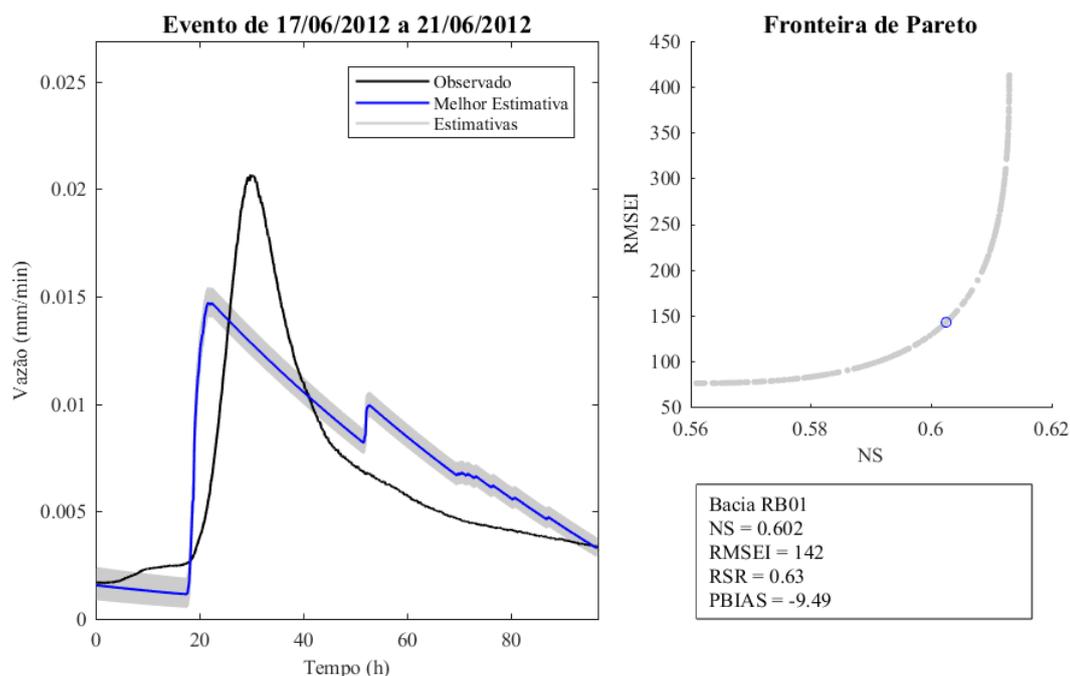


Figura 43 – Resultados da validação de escoamento para o evento (5) da bacia RB01



As métricas utilizadas para avaliar a qualidade da simulação indicam que a validação do escoamento para a bacia RB01 é satisfatória. Numericamente, há correspondência satisfatória entre o hidrograma simulado e o hidrograma observado.

Por outro lado, a análise gráfica demonstra que o modelo subestimou o escoamento de base antes da ascensão do hidrograma e superestimou a recessão do hidrograma para o evento (4). Para esse mesmo evento, verifica-se que a magnitude do pico do hidrograma simulado foi subestimada e a ocorrência do pico foi levemente adiantada em relação ao pico do hidrograma observado. Para o evento (5) é verificado o mesmo comportamento para o hidrograma simulado. O escoamento de base foi um pouco subestimado antes da ascensão do hidrograma e superestimado na recessão. O pico do escoamento foi subestimado e adiantado em relação ao observado.

Apesar do diagrama de Pareto do evento (4) apresentar um conjunto relativamente heterogêneo de soluções, a fronteira não é bem definida. Para o evento (5) o diagrama indica que o conjunto de soluções gerado pelo algoritmo foi bastante diverso, sem presença de nichos localizados, com fronteira bem definida e descrita por uma linha contínua.

5.3.3. Resultados da validação de escoamento para a bacia RB10

A Figura 44 e a Figura 45, respectivamente, apresentam os gráficos dos resultados da calibração de escoamento para os eventos (4) e (5) da bacia RB10. Nos gráficos são exibidos o hidrograma observado e as estimativas geradas a partir da simulação do Tank Model aplicando os valores otimizados dos parâmetros do modelo. São apresentados também o desempenho das métricas *NS*, *RMSEI*, *RSR* e *PBIAS*, e a Fronteira de Pareto.

Figura 44 – Resultados da validação de escoamento para o evento (4) da bacia RB10

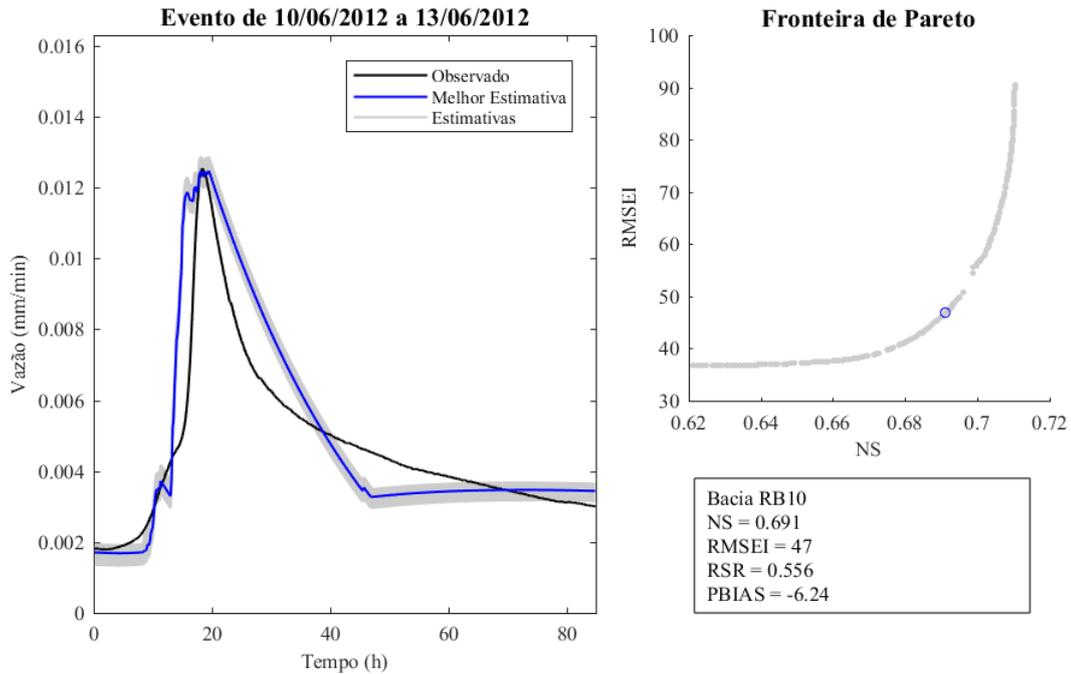
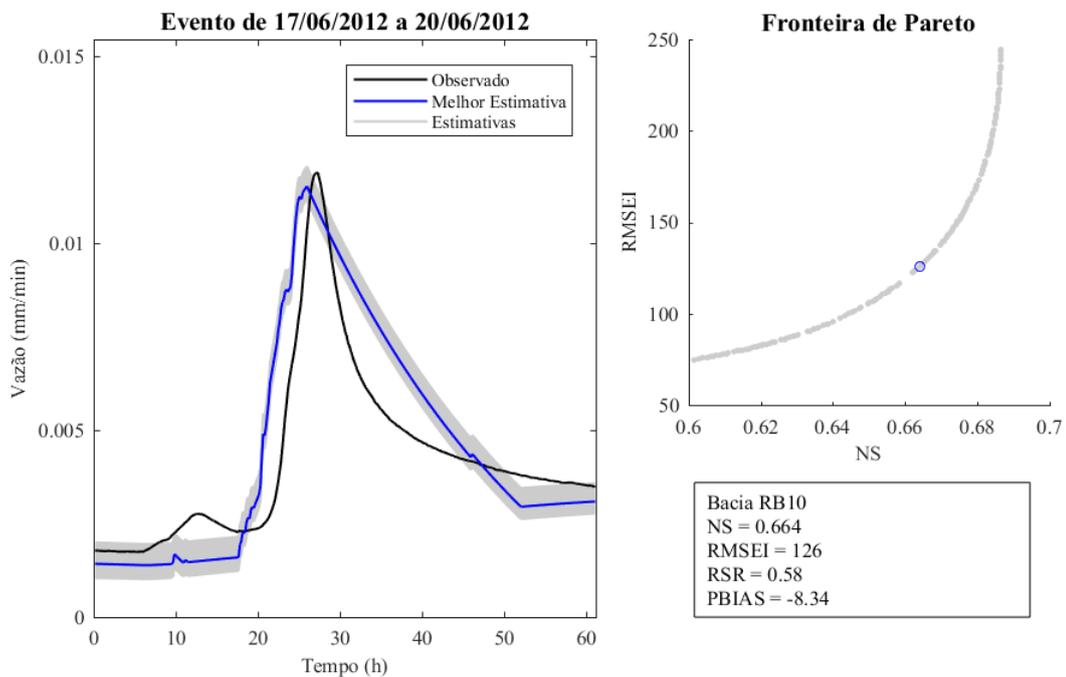


Figura 45 – Resultados da validação de escoamento para o evento (5) da bacia RB10



Os gráficos de resultados da validação de escoamento para a bacia RB10 apresentam correspondência satisfatória entre o hidrograma simulado e o hidrograma observado.

Para o evento (5), verifica-se que o escoamento de base foi levemente subestimado antes da ascensão do hidrograma e que a ascensão e o pico do escoamento simulado foram um pouco adiantados em relação ao tempo do evento de escoamento observado. Para os eventos (4) e (5) o pico do hidrograma observado foi bem representado em termos de magnitude. Também para

ambos os eventos a recessão foi superestimada logo após o pico do hidrograma observado e o escoamento foi subestimado na transição do escoamento superficial para o escoamento de base, sendo que na transição a curva não foi suave.

Os diagramas de Pareto dos eventos (4) e (5) indicam que o conjunto de soluções foi bastante diverso, sem presença de nichos localizados, com fronteira bem definida e descrita por uma linha contínua.

5.3.4. Resultados da validação de escoamento para a bacia RB11

A Figura 46 e a Figura 47, respectivamente, apresentam os gráficos dos resultados da calibração de escoamento para os eventos (4) e (5) da bacia RB11. Nos gráficos são exibidos o hidrograma observado e as estimativas geradas a partir da simulação do Tank Model aplicando os valores otimizados dos parâmetros do modelo. São apresentados também o desempenho das métricas *NS*, *RMSEI*, *RSR* e *PBIAS*, e a Fronteira de Pareto.

Figura 46 – Resultados da validação de escoamento para o evento (4) da bacia RB11

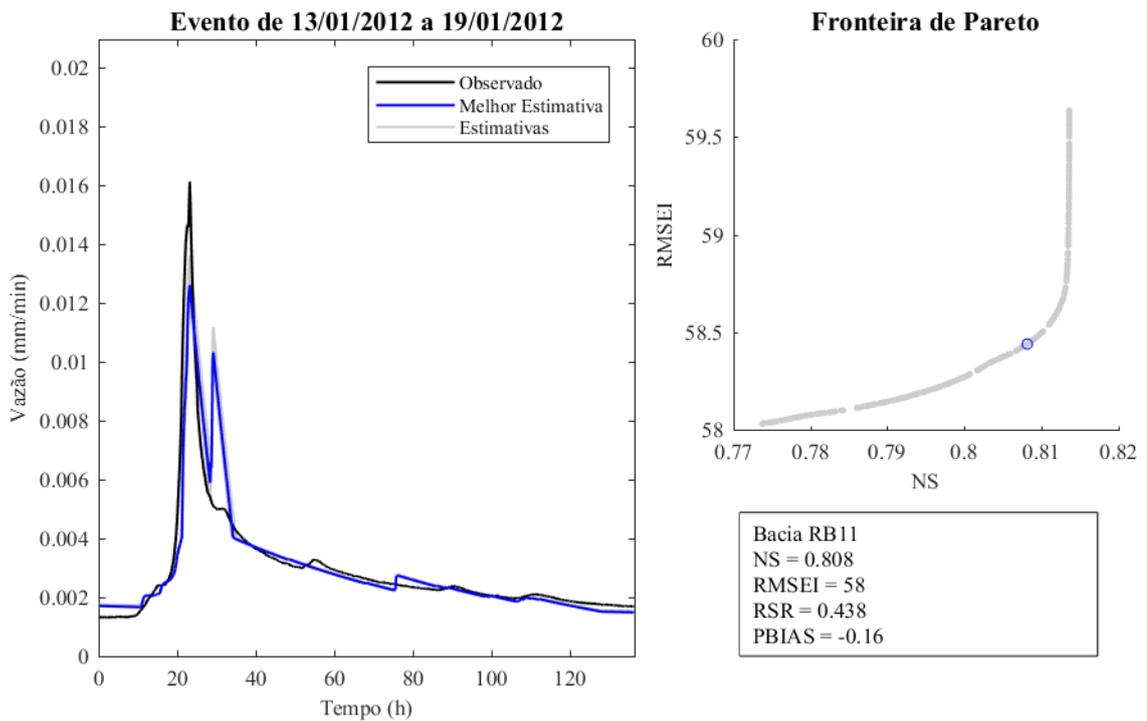
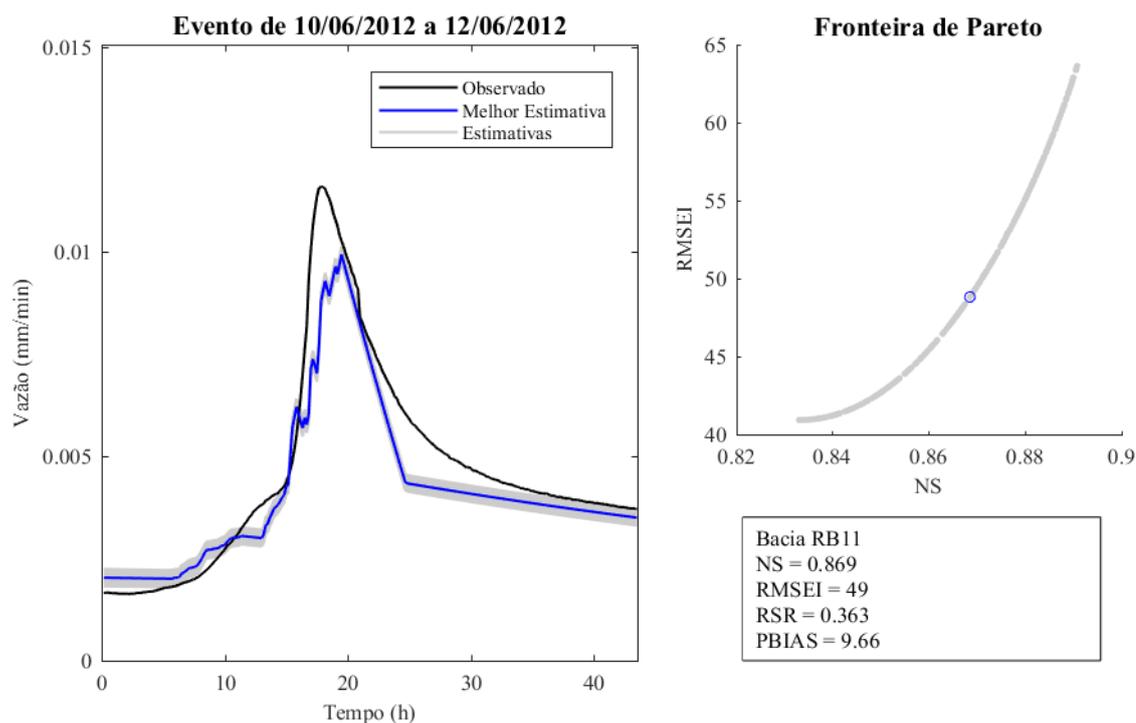


Figura 47 – Resultados da validação de escoamento para o evento (5) da bacia RB11



Os gráficos de resultados da validação de escoamento para a bacia RB11 apresentam concordância satisfatória entre o hidrograma simulado e o hidrograma observado.

Para o evento (4) o escoamento de base foi bem representado, assim como o pico do hidrograma em relação ao tempo do escoamento observado. Entretanto, a magnitude do pico do hidrograma foi subestimada. Verifica-se também que o modelo estimou um segundo pico escoamento, o qual não está presente no hidrograma observado. Para o evento (5), o modelo representou satisfatoriamente o formato do hidrograma observado, mas o escoamento simulado foi subestimado no pico e na recessão. Além disso, a curva do hidrograma simulado não foi suave na transição do escoamento superficial para o escoamento de base.

O diagrama de Pareto do evento (4) indica que o conjunto de soluções gerado pelo algoritmo foi bastante diverso, sem presença de nichos localizados, com fronteira bem definida e descrita por uma linha contínua. Para o evento (5) a população de soluções é diversa, mas fronteira de Pareto não é bem definida.

5.4. Resultados da calibração de descarga de sedimentos

Na modelagem do Tank Model para produção de sedimentos, a entrada de sedimentos do modelo é estabelecida matematicamente pela multiplicação da concentração de sedimentos da bacia, representada pelo parâmetro X , e a intensidade da precipitação, representada pelo parâmetro I , elevada a uma determinada potência a , desconhecida. Assim, para determinar a natureza da componente que descreve a entrada de sedimentos do Tank Model modificado ($I.X^a$), foram testadas diferentes potências a inteiras como forma de verificar a possibilidade de

melhorias no resultado da simulação de descarga de sedimentos. Foram testados valores de $a = 1$, $a = 2$, $a = 3$, $a = 4$ e $a = 5$.

A Figura 48, a Figura 49, a Figura 50 e a Figura 51 apresentam, respectivamente, os resultados das relações entre X e I estabelecidas por diferentes valores do parâmetro a , em termos das métricas NS , $RMSEI$, RSR e $PBIAS$. Esses resultados foram obtidos pela aplicação do Tank Model para simulação da descarga de sedimentos para os eventos hidrossedimentológicos apresentados na Tabela 25.

Figura 48 – Resultados do coeficiente de NS para diferentes potências (a) de intensidade de precipitação

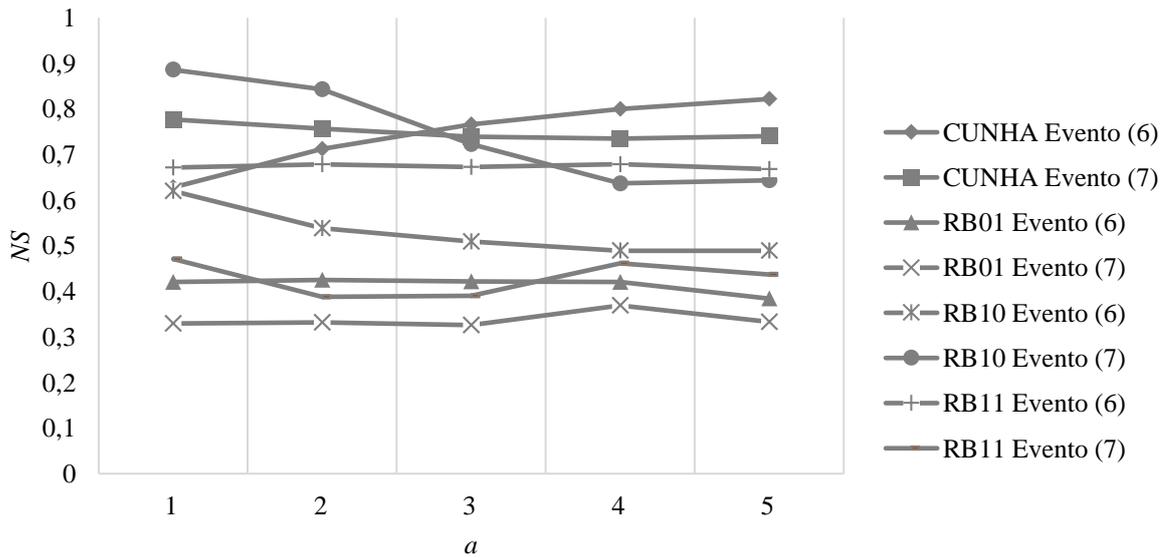


Figura 49 – Resultados do coeficiente de $RMSEI$ para diferentes potências (a) de intensidade de precipitação

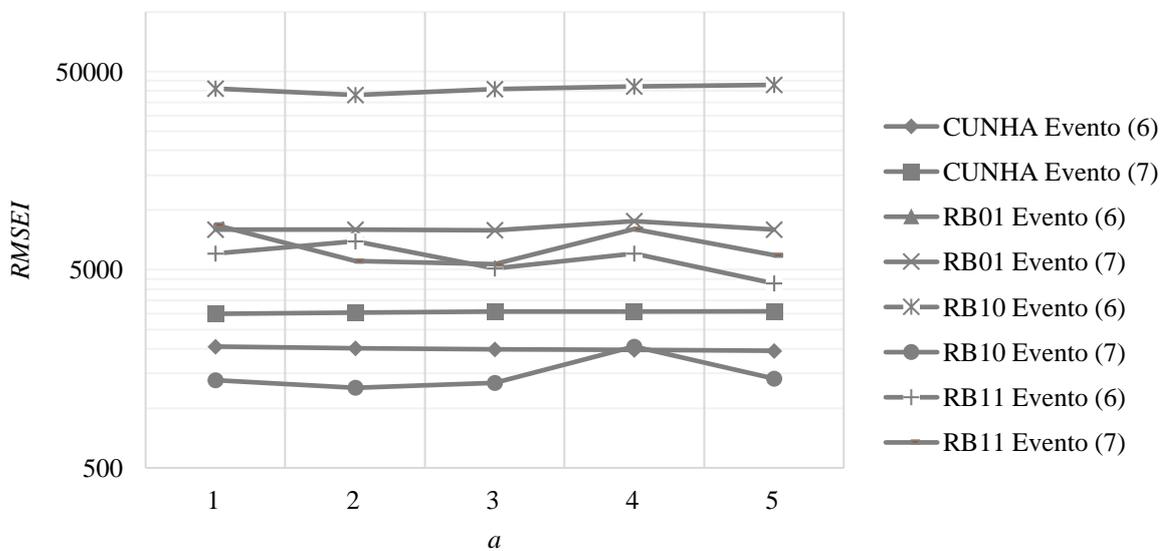


Figura 50 – Resultados do coeficiente de *RSR* para diferentes potências (*a*) de intensidade de precipitação

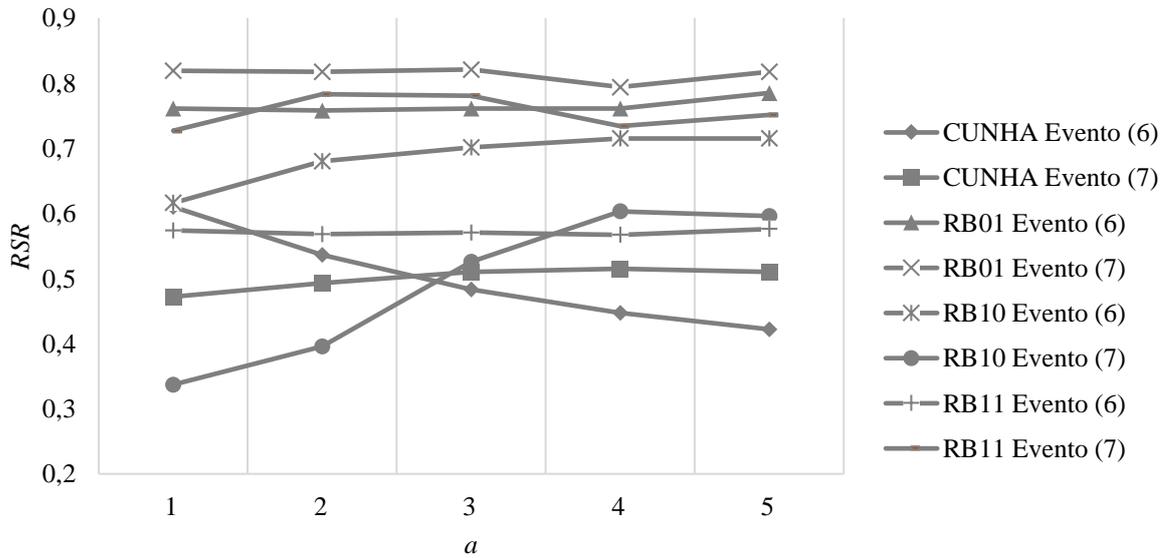
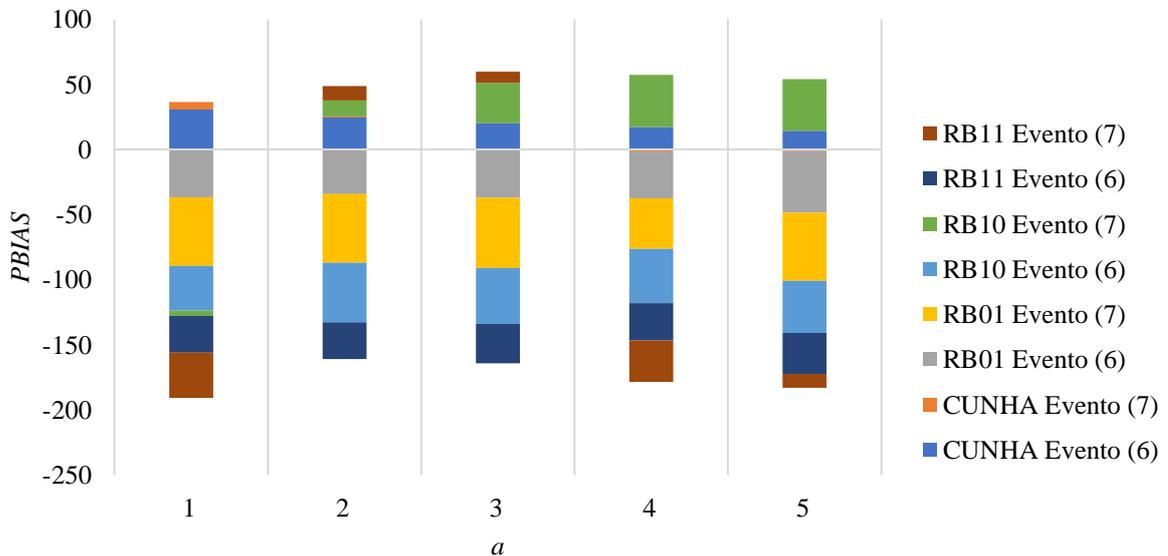


Figura 51 – Resultados do coeficiente de *PBIAS* para diferentes potências (*a*) de intensidade de precipitação



Os resultados encontrados testando diferentes valores do parâmetro *a* demonstram que não há ganho expressivo na qualidade da simulação de descarga de sedimentos para potências maiores que a unidade.

Para o coeficiente *NS*, verifica-se melhoria com valores de *a* > 1 apenas para o evento (6) da bacia do Rio Cunha. Para os demais eventos, o valor do coeficiente permaneceu praticamente constante ou decresceu com o aumento do valor de *a*.

Para o coeficiente *RSR*, foi verificada a mesma tendência. Observou-se melhoria considerável para o evento (6) da bacia do Rio Cunha com o aumento de *a*. Os demais eventos, em geral, não exibiram variação considerável de *RSR* ou exibiram valores maiores para *a* > 1, indicando que a simulação do modelo tende a piorar com o aumento do valor de *a*.

Para o coeficiente *RMSEI* também não foi verificado melhoria no resultado da simulação com o aumento de *a*.

Os valores de *PBIAS* variaram principalmente para os resultados da simulação da descarga de sedimentos do evento (7) da bacia RB10 e do evento (7) da bacia RB11. Em geral, não se nota diminuição expressiva na amplitude total do viés para valores de $a > 1$ considerando os eventos simulados.

Considerando os resultados apresentados, definiu-se a relação linear ($a = 1$) como sendo a melhor para descrever a entrada de sedimentos do Tank Model modificado. Além do mais, justifica-se o uso da relação linear visto que a adoção de um valor de *a* maior que a unidade potencializa eventuais erros na medição da precipitação.

Adicionalmente foi testada a proposta de dois tanques em série para descrever a descarga de sedimentos. Os resultados da simulação de descarga de sedimentos para um tanque foram tão ou mais satisfatórios do que os resultados da simulação para dois tanques (resultados não apresentados). Dessa forma, para simplificar o modelo e otimizar o esforço computacional, optou-se por utilizar apenas um tanque para simular a descarga de sedimentos. A contribuição insignificante de um segundo tanque para a descarga de sedimentos pode estar associada à abordagem por eventos adotada, para a qual o período simulado é de apenas algumas horas ou dias. Em aplicações cujo período simulado for maior a inserção de um segundo tanque pode ser necessária para representar adequadamente a descarga de sedimentos de base.

Após a calibração e validação do Tank Model para escoamento o modelo foi aplicado para simular a descarga de sedimentos. Os parâmetros otimizados para o escoamento foram definidos como parâmetros de entrada do modelo e, para cada evento hidrossedimentológico da Tabela 25, a concentração de sedimentos (*X*) e a massa de sedimentos inicial (*SMI*) foram calibrados.

A Tabela 28 exhibe o desempenho das métricas *NS*, *RMSEI*, *RSR* e *PBIAS* para a calibração de descarga de sedimentos das bacias do Rio Cunha, RB01, RB10 e RB11.

Tabela 28 – Desempenho das métricas *NS*, *RMSEI*, *RSR* e *PBIAS* para a calibração de descarga de sedimentos do Tank Model

Bacia	Evento	<i>NS</i>	<i>RMSEI</i>	<i>RSR</i>	<i>PBIAS</i>
Cunha	(6)	0,628	2048	0,610	30,85
	(7)	0,777	2997	0,472	5,62
RB01	(6)	0,420	192	0,761	-36,54
	(7)	0,330	7957	0,819	-53,06
RB10	(6)	0,620	41089	0,616	-33,98
	(7)	0,886	1387	0,337	-4,40
RB11	(6)	0,669	5391	0,576	-29,29
	(7)	0,471	8613	0,727	-42,89
Mínimo		0,330	192	0,337	-53,060
Máximo		0,886	41089	0,819	30,850
Média		0,600	8709,250	0,615	-20,461

Verifica-se que os valores de *NS* variaram de 0,330 a 0,886. A simulação de descarga de sedimentos foi satisfatória para a maioria dos eventos analisados, para os quais os valores de *NS* ficaram incluídos dentro da faixa de 0,36 a 0,75 ou foram superiores a 0,75. Apenas a simulação de descarga de sedimentos do evento (7) da bacia RB01 gerou um resultado de *NS* abaixo do valor de referência de 0,36. Para esse evento a simulação não foi satisfatória.

Os valores de *RSR* variaram de 0,337 a 0,819. Quanto a esse coeficiente o modelo também pode ser classificado como satisfatório para a maioria dos eventos analisados. Três eventos simulados de descarga de sedimentos apresentaram valores fora da faixa recomendada ($RSR < 0,70$), foram eles o evento (6) e o evento (7) da bacia RB01 e o evento (7) da bacia RB11.

Os valores de *PBIAS* variaram de -53,06% a 30,85%. Quanto a esse coeficiente o modelo pode ser classificado como satisfatório. Todos os valores de *PBIAS* em termos absolutos ficaram abaixo de 55%, indicando bom desempenho da simulação do modelo. Verifica-se que para alguns eventos o escoamento foi subestimado pela simulação e para outros o escoamento foi superestimado.

A qualidade da simulação de descarga de sedimentos não pode ser avaliada em termos de *RMSEI*, porém, considerando os resultados de *NS*, *RSR* e *PBIAS* o modelo pode ser classificado como calibrado e adequado para simulação da descarga de sedimentos. Há um bom ajuste entre os valores simulados pelo Tank Model e os valores observados de descarga de sedimentos.

5.4.1. Resultados da calibração de descarga de sedimentos para a bacia do Rio Cunha

A Figura 52 e a Figura 53, respectivamente, apresentam os gráficos dos resultados da calibração de descarga de sedimentos para os eventos (6) e (7) da bacia do Rio Cunha. Nos gráficos são exibidos o sedimentograma observado e as estimativas geradas a partir da simulação do Tank Model aplicando os valores otimizados dos parâmetros do modelo. São apresentados também o desempenho das métricas *NS*, *RMSEI*, *RSR* e *PBIAS*, e a Fronteira de Pareto.

Para cada evento hidrossedimentológico, a calibração dos parâmetros *X* e *SMI* gerou um conjunto de 200 soluções que forneceram as melhores estimativas de descarga de sedimentos. Nessa etapa, a melhor estimativa também foi definida como sendo aquela que apresentou a menor distância euclidiana do ponto da fronteira de Pareto até o ponto ideal para as métricas *NS* e *RMSEI* normalizadas.

Figura 52 – Resultados da calibração de descarga de sedimentos para o Evento (6) da bacia do Rio Cunha

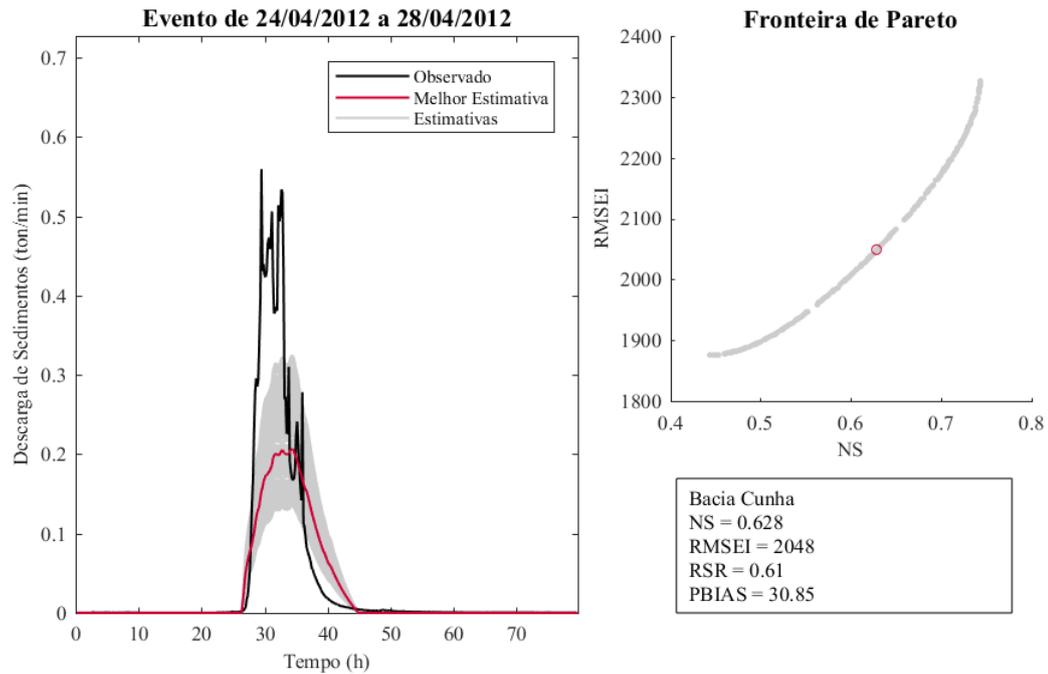
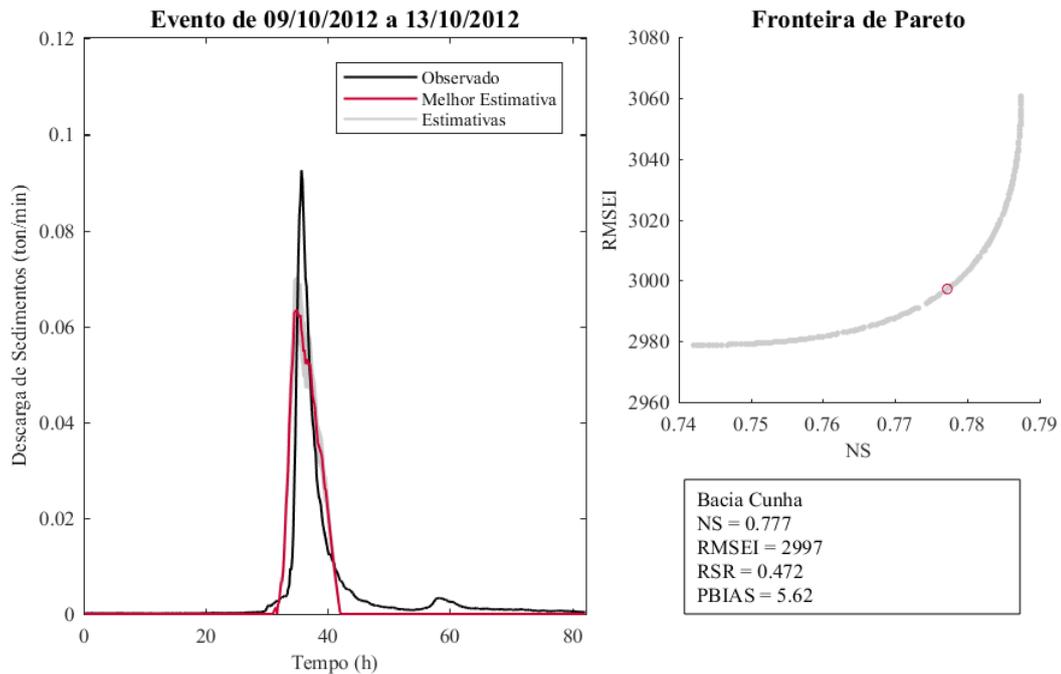


Figura 53 – Resultados da calibração de descarga de sedimentos para o Evento (7) da bacia do Rio Cunha



Em geral, os gráficos de resultados da calibração de descarga de sedimentos para a bacia do Rio Cunha apresentaram concordância satisfatória entre o sedimentograma simulado e o sedimentograma observado.

Para o evento (6) verifica-se que o pico do sedimentograma simulado foi subestimado e a recessão foi um pouco superestimada. Para o evento (7) o pico do hidrograma, assim como a transição da descarga de sedimentos superficial para a descarga de base foram subestimados. Para ambos os eventos a curva do sedimentograma simulado não foi suave na transição da descarga de sedimentos superficial para a descarga de base.

Os diagramas de Pareto dos eventos indicam que o conjunto de soluções gerada pelo algoritmo foi diverso, sem presença de nichos localizados, com fronteira bem definida e descrita por uma linha contínua.

5.4.2. Resultados da calibração de descarga de sedimentos para a bacia RB01

A Figura 54 e a Figura 55, respectivamente, apresentam os gráficos dos resultados da calibração de descarga de sedimentos para os eventos (6) e (7) da bacia RB01. Nos gráficos são exibidos o sedimentograma observado e as estimativas geradas a partir da simulação do Tank Model aplicando os valores otimizados dos parâmetros do modelo. São apresentados também o desempenho das métricas *NS*, *RMSEI*, *RSR* e *PBIAS*, e a Fronteira de Pareto.

Figura 54 – Resultados da calibração de descarga de sedimentos para o Evento (6) da bacia RB01

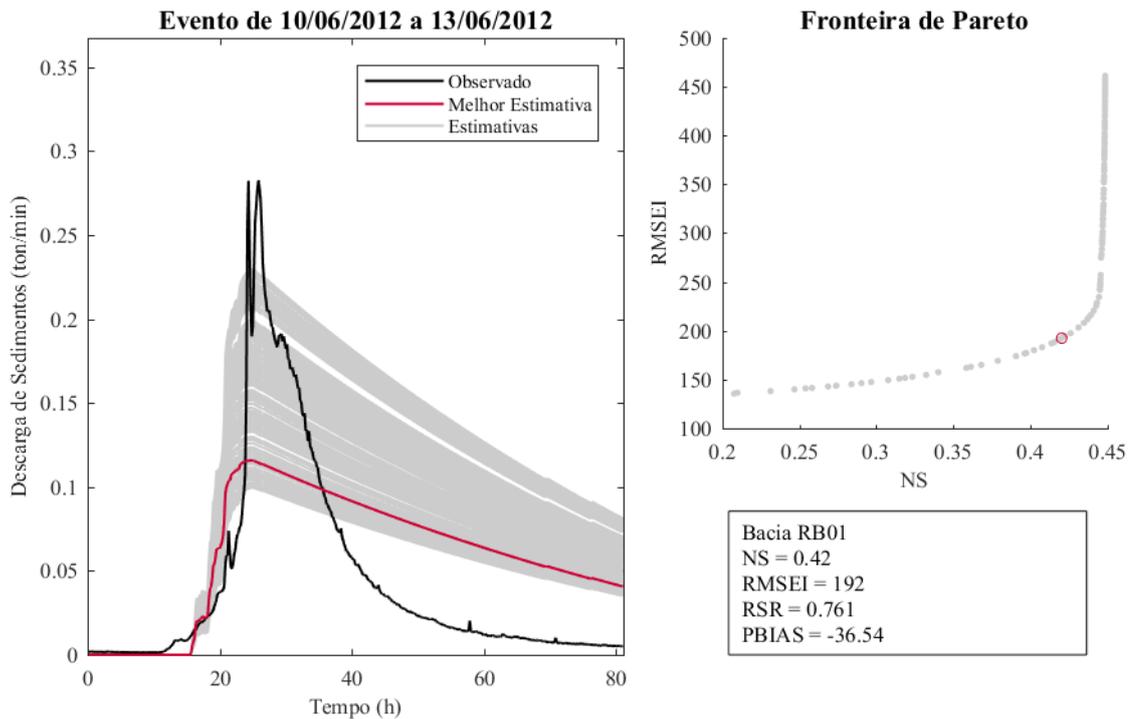
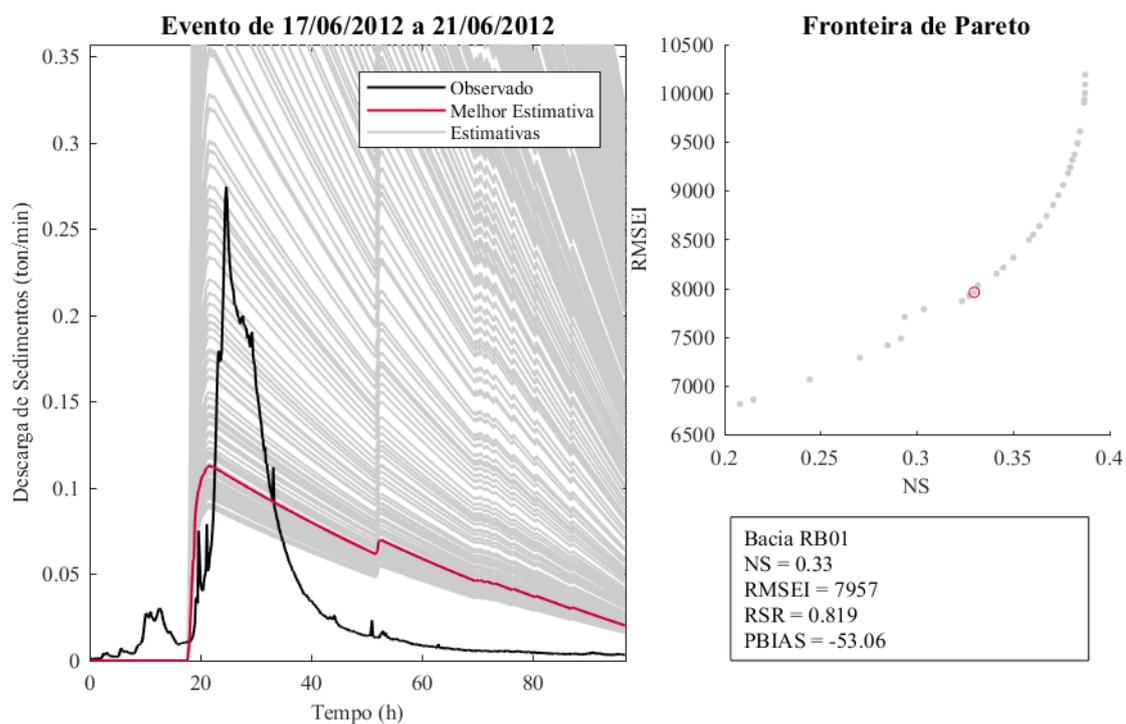


Figura 55 – Resultados da calibração de descarga de sedimentos para o Evento (7) da bacia RB01



Os gráficos de resultados da calibração de descarga de sedimentos para a bacia RB01 mostram que o desempenho do modelo não foi satisfatório. O baixo desempenho também pode ser verificado pelo valor das métricas *NS* e *RSR*.

Tanto para o evento (6) quanto para o evento (7) o pico do sedimentograma simulado foi subestimado e a recessão superestimada.

Os diagramas de Pareto dos eventos indicam que o conjunto de soluções gerada pelo algoritmo foi diverso, sem presença de nichos localizados, com fronteira bem definida.

5.4.3. Resultados da calibração de descarga de sedimentos para a bacia RB10

A Figura 56 e a Figura 57, respectivamente, apresentam os gráficos dos resultados da calibração de descarga de sedimentos para os eventos (6) e (7) da bacia RB10. Nos gráficos são exibidos o sedimentograma observado e as estimativas geradas a partir da simulação do Tank Model aplicando os valores otimizados dos parâmetros do modelo. São apresentados também o desempenho das métricas *NS*, *RMSEI*, *RSR* e *PBIAS*, e a Fronteira de Pareto.

Figura 56 – Resultados da calibração de descarga de sedimentos para o Evento (6) da Bacia Hidrográfica RB10

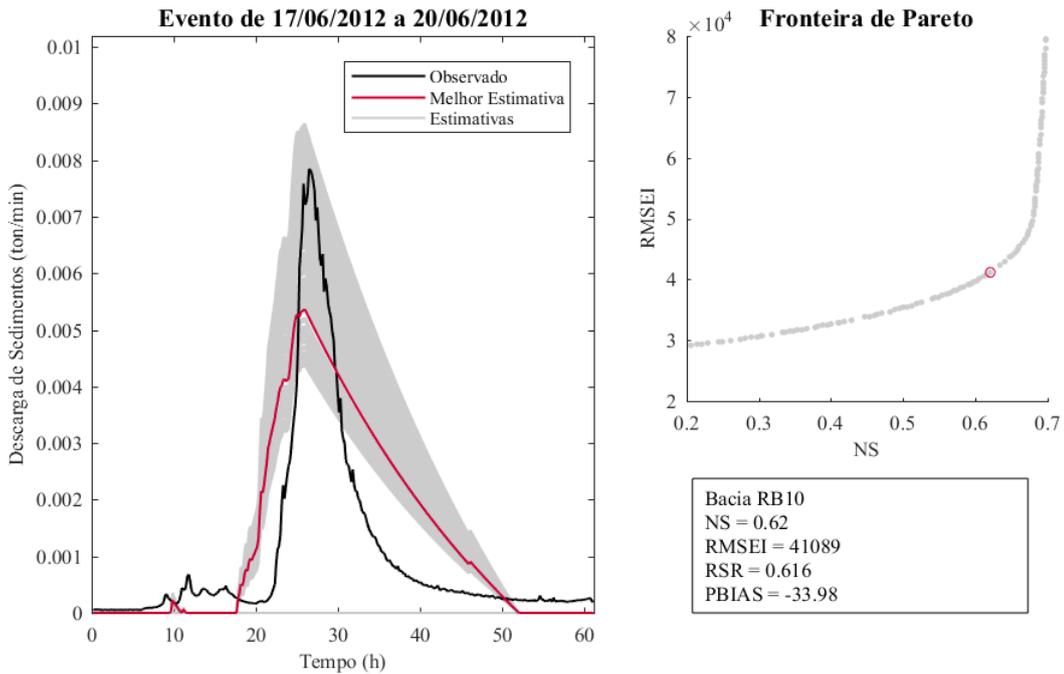
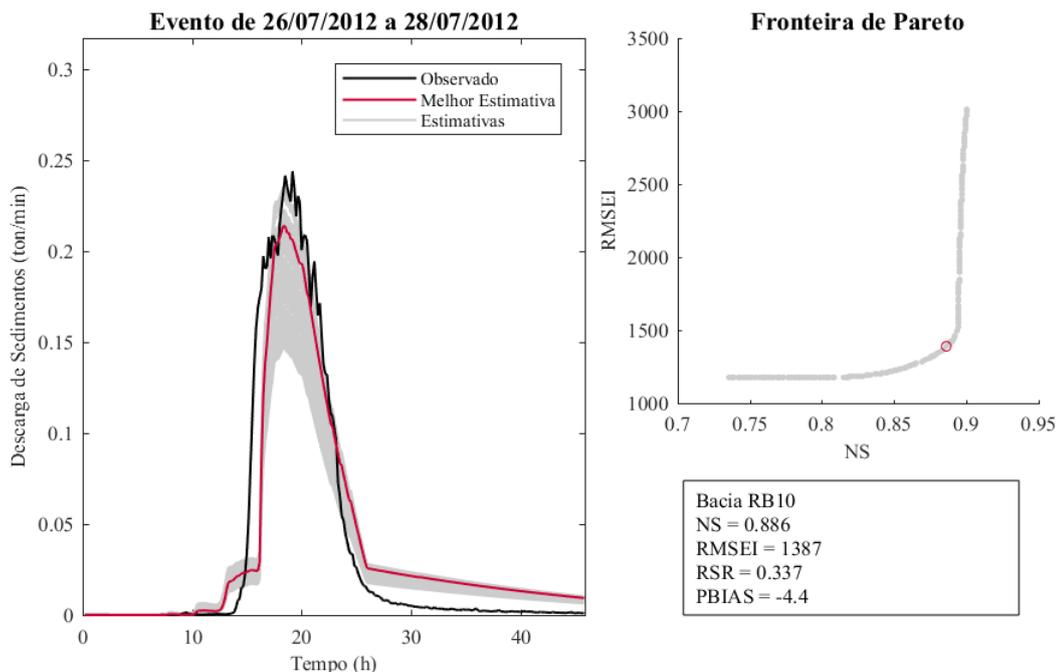


Figura 57 – Resultados da calibração de descarga de sedimentos para o Evento (7) da Bacia Hidrográfica RB10



O desempenho da calibração de descarga de sedimentos do evento (7) foi muito bom. Apesar da transição da descarga de sedimentos superficial para a descarga de base ter sido superestimada, o sedimentograma simulado, em geral, apresentou ótima correspondência com o sedimentograma observado, principalmente para o pico do evento. Já para o evento (6), o

desempenho não foi tão bom, mas pode ser considerado satisfatório. O gráfico indica que a ascensão do sedimentograma simulado foi adiantado, além disso, o pico da descarga foi subestimado e a recessão superestimada. Tanto para o evento (6) quanto para o evento (7) a curva do sedimentograma simulado não foi suave na transição da descarga de sedimentos superficial para a descarga de base.

Os diagramas de Pareto dos eventos indicam que o conjunto de soluções gerada pelo algoritmo foi diverso, sem presença de nichos localizados, com fronteira bem definida e descrita por uma linha contínua.

5.4.4. Resultados da calibração de descarga de sedimentos para a bacia RB11

A Figura 58 e a Figura 59, respectivamente, apresentam os gráficos dos resultados da calibração de descarga de sedimentos para os eventos (6) e (7) da bacia RB11. Nos gráficos são exibidos o sedimentograma observado e as estimativas geradas a partir da simulação do Tank Model aplicando os valores otimizados dos parâmetros do modelo. São apresentados também o desempenho das métricas *NS*, *RMSEI*, *RSR* e *PBIAS*, e a Fronteira de Pareto.

Figura 58 – Resultados da calibração de descarga de sedimentos para o Evento (6) da Bacia Hidrográfica RB11

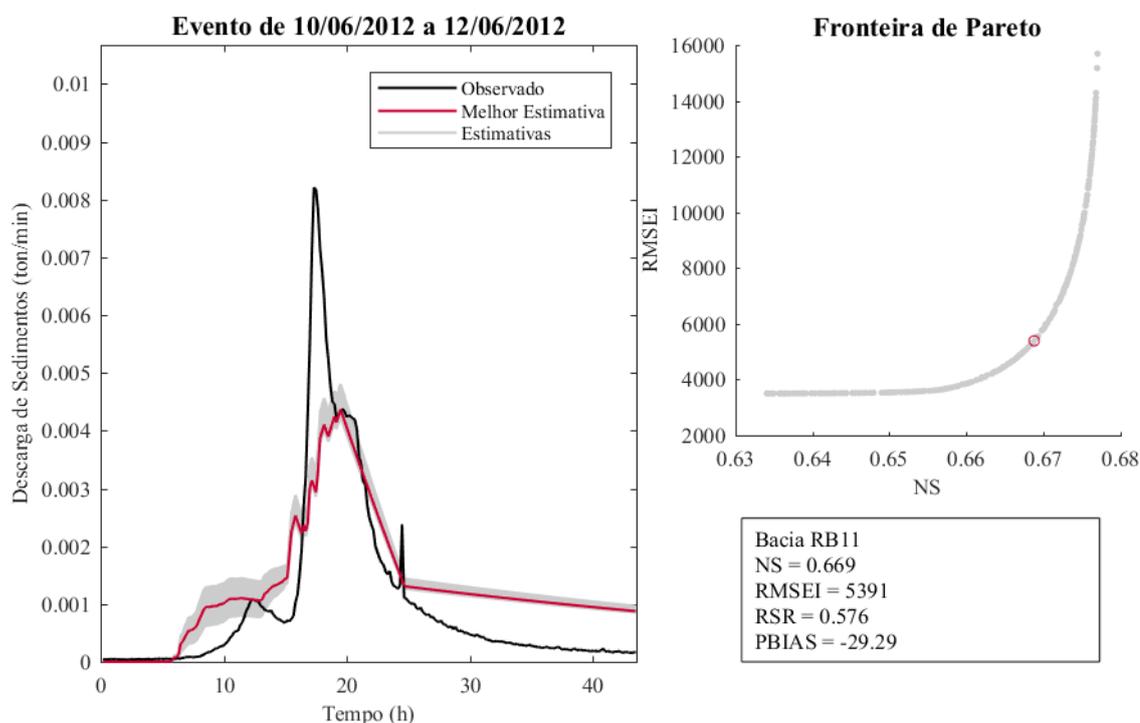
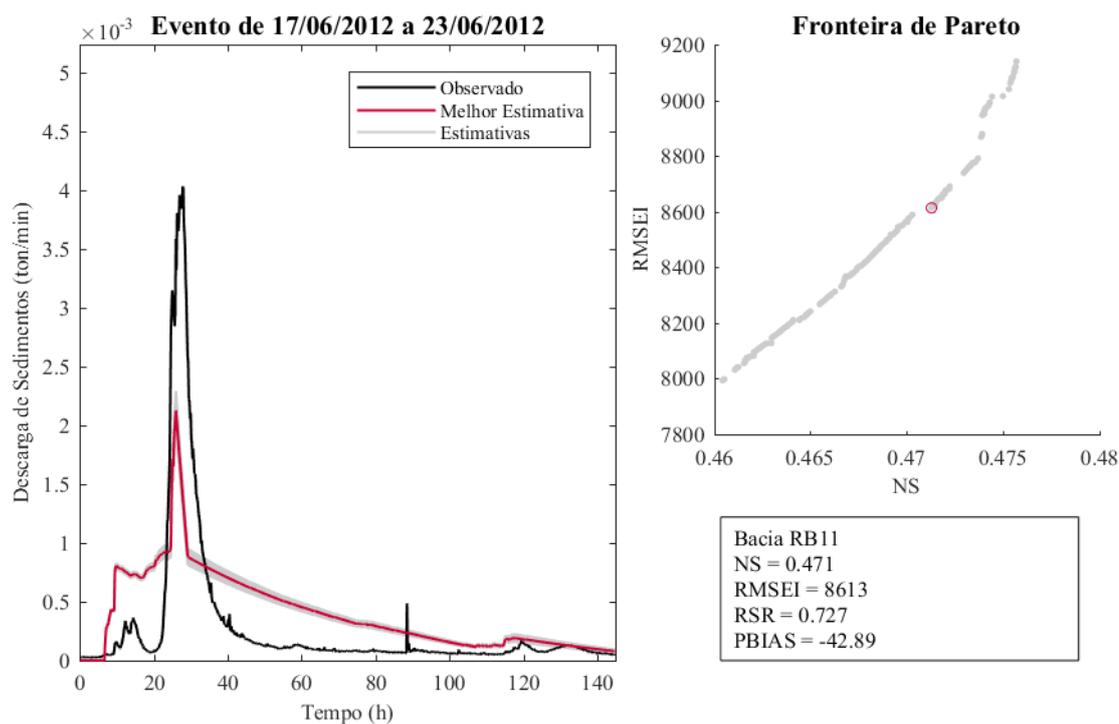


Figura 59 – Resultados da calibração de descarga de sedimentos para o Evento (7) da Bacia Hidrográfica RB11



O gráfico de resultados da calibração de descarga de sedimentos para o evento (6) mostra que o pico do sedimentograma simulado foi subestimado e a transição da descarga de sedimentos superficial para a descarga de base foi superestimada. O gráfico para o evento (7) mostra que o pico do sedimentograma simulado também foi subestimado, além disso, o início do escoamento superficial foi superestimado, assim como a transição da descarga de sedimentos superficial para a descarga de base. Para ambos os eventos a curva do sedimentograma simulado não foi suave na transição da descarga de sedimentos superficial para a descarga de base.

Os diagramas de Pareto dos eventos indicam que o conjunto de soluções gerada pelo algoritmo foi diverso, sem presença de nichos localizados, com fronteira bem definida.

5.5. Parâmetros otimizados do Tank Model

A Tabela 29 apresenta os valores ótimos dos parâmetros do Tank Model determinados por meio da calibração de escoamento dos eventos hidrossedimentológicos da Tabela 23.

A Tabela 30 apresenta os parâmetros otimizados do Tank Model para as bacias hidrográficas da área de estudo, obtidos por meio do cálculo da mediana dos resultados apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Valores ótimos dos parâmetros do Tank Model para a calibração de escoamento por evento hidrossedimentológico

Parâmetro	Eventos por Bacia					
	Cunha			RB01		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
<i>SI</i>	0,01357	0,14062	0,61632	0,44692	0,05031	0,56593
<i>S2</i>	63,58599	47,60727	74,34083	62,67192	34,47670	12,55715
<i>A0</i>	0,02946	0,02068	0,09000	0,00113	0,00101	0,01164
<i>B0</i>	0,00032	0,00058	0,00090	0,00048	0,00090	0,00232
<i>A1</i>	0,00117	0,00118	0,00151	0,00083	0,00010	0,00064
<i>A2</i>	0,07474	0,06950	0,06654	0,08653	0,00100	0,05170
<i>B1</i>	0,00007	0,00008	0,00006	0,00011	0,00010	0,02591
<i>HA1</i>	6,29688	4,78967	0,00000	29,12596	18,21897	0,00000
<i>HA2</i>	42,78306	60,35605	46,36076	68,24976	36,51050	63,49815
<i>HB1</i>	27,48952	17,73762	31,42094	47,51954	25,30777	36,76982
Parâmetro	Eventos por Bacia					
	RB10			RB11		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
<i>SI</i>	1,25877	1,28035	1,50000	0,55143	1,12715	1,09816
<i>S2</i>	46,53383	24,09574	74,60699	100,55383	104,98805	99,50511
<i>A0</i>	0,01246	0,00455	0,00500	0,00337	0,00244	0,00258
<i>B0</i>	0,00054	0,00004	0,00037	0,00049	0,00017	0,00038
<i>A1</i>	0,00066	0,00022	0,00057	0,00009	0,00009	0,00008
<i>A2</i>	0,01307	0,00250	0,01090	0,00263	0,00170	0,00161
<i>B1</i>	0,00008	0,00010	0,00002	0,00001	0,00001	0,00001
<i>HA1</i>	12,11436	23,09320	12,16789	8,09180	0,00307	6,12146
<i>HA2</i>	64,49518	34,11541	48,91653	35,70736	30,01096	31,92188
<i>HB1</i>	26,27626	14,13659	14,04389	1,15163	0,00023	2,54808

Tabela 30 – Parâmetros otimizados do Tank Model por bacia hidrográfica

Parâmetro	Bacias			
	Cunha	RB01	RB10	RB11
<i>A0</i>	0,02946	0,00113	0,00500	0,00258
<i>B0</i>	0,00058	0,00090	0,00037	0,00038
<i>A1</i>	0,00118	0,00064	0,00057	0,00009
<i>A2</i>	0,06950	0,05170	0,01090	0,00170
<i>B1</i>	0,00007	0,00011	0,00008	0,00001
<i>HA1</i>	4,78967	18,21897	12,16789	6,12146
<i>HA2</i>	46,36076	63,49815	48,91653	31,92188
<i>HB1</i>	27,48952	36,76982	14,13659	1,15163

A Tabela 31 apresenta os valores ótimos dos parâmetros do Tank Model para a validação de escoamento dos eventos hidrossedimentológicos da Tabela 24.

Tabela 31 – Valores ótimos dos parâmetros do Tank Model para a validação de escoamento por evento hidrossedimentológico

Parâmetro	Eventos por Bacia							
	Cunha		RB01		RB10		RB11	
	(4)	(5)	(4)	(5)	(4)	(5)	(4)	(5)
<i>S1</i>	1,50000	1,45472	0,32789	0,00000	0,00000	0,00004	0,66808	1,50000
<i>S2</i>	51,99539	38,60435	41,67538	51,35010	34,97829	31,54541	190,91820	226,49823

A Tabela 32 apresenta os valores ótimos dos parâmetros do Tank Model para a calibração de descarga de sedimentos dos eventos hidrossedimentológicos da Tabela 25.

Tabela 32 – Valores ótimos dos parâmetros do Tank Model para a calibração de descarga de sedimentos por evento hidrossedimentológico

Parâmetro	Eventos por Bacia							
	Cunha		RB01		RB10		RB11	
	(6)	(7)	(6)	(7)	(6)	(7)	(6)	(7)
<i>X</i>	7,22443	7,08715	0,00552	0,00000	0,43567	1,22560	0,15601	0,02604
<i>SM1</i>	45,03688	0,68213	343,30574	379,51760	7,11098	0,00000	18,80944	17,57827

5.6. Características das bacias hidrográficas

Os valores calculados para as métricas que descrevem as características das bacias hidrográficas da área de estudo são apresentados nas tabelas a seguir. A Tabela 33 exhibe os valores para as métricas relacionadas às características morfológicas. A Tabela 34 exhibe os valores para as métricas relacionadas à geologia. A Tabela 35 exhibe os valores para as métricas relacionadas às características do solo. A Tabela 36 exhibe os valores para as métricas relacionadas ao uso do solo. A Tabela 37 e a Tabela 38 exibem os valores para as métricas relacionadas à fatores climático-hidrológicos.

Tabela 33 – Valores para as métricas relacionadas às características morfológicas da bacia hidrográfica

No.	Símbolo	Definição	Unidade	Bacias			
				Cunha	RB01	RB10	RB11
1	<i>Ab</i>	Área da Bacia	km ²	16,72	64,41	11,45	6,95
2	<i>Pe</i>	Perímetro da Bacia	km	25,34	51,05	18,50	15,62
3	<i>Am</i>	Altitude Média	m	513,46	902,47	933,94	939,83
4	<i>Kc</i>	Coefficiente de Compacidade	-	1,74	1,78	1,53	1,66
5	<i>Kf</i>	Fator de Forma	-	0,21	0,13	0,28	0,27
6	<i>Ic</i>	Índice de Circularidade	-	0,33	0,31	0,42	0,36
7	<i>Dm</i>	Declividade Média	%	32,49	17,50	19,03	16,57
8	<i>Dp</i>	Declividade – Porção de Área Plano	%	1,20	2,18	1,92	2,44
9	<i>Dso</i>	Declividade – Porção de Área Suave Ondulado	%	7,72	17,30	13,09	16,19
10	<i>Do</i>	Declividade – Porção de Área Ondulado	%	22,55	47,78	44,94	50,14
11	<i>Dfo</i>	Declividade – Porção de Área Forte Ondulado	%	43,06	30,21	37,61	30,52
12	<i>Dmo</i>	Declividade – Porção de Área Montanhoso	%	22,85	2,51	2,44	0,72
13	<i>De</i>	Declividade – Porção de Área Escarpado	%	2,63	0,02	0,00	0,00
14	<i>Dr</i>	Comprimento Drenagem	km	54,25	154,52	32,23	19,55
15	<i>Ct</i>	Comprimento do Rio Principal	km	8,85	22,26	6,43	5,09
16	<i>Dd</i>	Densidade de Drenagem	km.km ⁻²	3,24	2,40	2,81	2,81

Tabela 34 – Valores para as métricas relacionadas à geologia da bacia hidrográfica

No.	Símbolo	Definição	Unidade	Bacias			
				Cunha	RB01	RB10	RB11
17	<i>DCGMGLgno</i>	Unidade Geológico-Ambiental - Porção de Área de DCGMGLgno	%	48,11	0,00	0,00	0,00
18	<i>DCGR2salc</i>	Unidade Geológico-Ambiental - Porção de Área de DCGR2salc	%	43,27	0,00	0,00	0,00
19	<i>DSVMPasaf</i>	Unidade Geológico-Ambiental - Porção de Área de DSVMPasaf	%	8,62	100,00	100,00	100,00

Tabela 35 – Valores para as métricas relacionadas às características do solo da bacia hidrográfica

No.	Símbolo	Definição	Unidade	Bacias			
				Cunha	RB01	RB10	RB11
20	<i>Ghb</i>	Grupo Hidrológico – Porção de Área de Classe B	%	33,89	0,00	0,00	0,00
21	<i>Ghc</i>	Grupo Hidrológico – Porção de Área de Classe C	%	0,00	26,45	0,00	0,00
22	<i>Ghd</i>	Grupo Hidrológico – Porção de Área de Classe D	%	66,11	73,55	100,00	100,00

Tabela 36 – Valores para as métricas relacionadas ao uso do solo da bacia hidrográfica

No.	Símbolo	Definição	Unidade	Bacias			
				Cunha	RB01	RB10	RB11
23	<i>Usf</i>	Porção de Área de Floresta Nativa	%	71,18	59,58	84,20	84,13
24	<i>Usr</i>	Porção de Área de Reflorestamento	%	3,18	23,01	7,99	8,37
25	<i>Uss</i>	Porção de Área de Solo Exposto	%	4,07	3,41	0,61	0,72
26	<i>Usp</i>	Porção de Área de Pastagem	%	20,37	9,14	4,57	5,19
27	<i>Use</i>	Porção de Área de Edificação	%	0,60	1,37	0,35	0,14
28	<i>Usa</i>	Porção de Área de Agricultura	%	0,60	3,49	2,28	1,44

Tabela 37 – Valores para as métricas relacionadas à fatores climático-hidrológicos da bacia hidrográfica: Índice de Precipitação Antecedente

No.	Símbolo	Definição	Unidade	Eventos por Bacia							
				Cunha		RB01		RB10		RB11	
				4	5	4	5	4	5	4	5
29	<i>Ipa(1)</i>	Índice de Precipitação Antecedente – 1 Dia	mm	0,60000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
30	<i>Ipa(2)</i>	Índice de Precipitação Antecedente – 2 Dias	mm	9,40000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,12000	0,00000	0,00000
31	<i>Ipa(3)</i>	Índice de Precipitação Antecedente – 3 Dias	mm	9,40000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,12000	0,76227	0,00000
32	<i>Ipa(4)</i>	Índice de Precipitação Antecedente – 4 Dias	mm	9,40000	0,00000	0,03000	0,03000	0,00000	0,12000	1,36574	0,00000
33	<i>Ipa(5)</i>	Índice de Precipitação Antecedente – 5 Dias	mm	9,41250	0,05000	0,36000	0,06000	0,36000	0,13500	1,54042	0,36000
34	<i>Ipa(6)</i>	Índice de Precipitação Antecedente – 6 Dias	mm	9,42500	0,10625	2,86250	0,06000	2,65375	0,14250	1,61189	2,65375
35	<i>Ipa(7)</i>	Índice de Precipitação Antecedente – 7 Dias	mm	9,42813	0,10938	3,27750	0,80156	3,46391	0,75578	1,66747	3,46391

Tabela 38 – Valores para as métricas relacionadas à fatores climático-hidrológicos da bacia hidrográfica: Índice de Precipitação para Sedimentos

No.	Símbolo	Definição	Unidade	Eventos por Bacia							
				Cunha		RB01		RB10		RB11	
				6	7	6	7	6	7	6	7
36	<i>Ips(1)</i>	Índice de Precipitação para Sedimentos - 1 Evento	min ⁻¹	0,06000	0,01765	0,00300	0,00998	0,00661	0,00619	0,00320	0,00661
37	<i>Ips(2)</i>	Índice de Precipitação para Sedimentos - 2 Eventos	min ⁻¹	0,02424	0,00641	0,00156	0,00204	0,00266	0,00977	0,00273	0,00250

Analisando os valores das tabelas observa-se que a área das bacias variou de 6,95 a 64,41 km², sendo a bacia RB11 a de menor dimensão e a bacia RB01 a de maior dimensão. O perímetro das bacias variou de 15,62 a 51,05 km e, seguindo a mesma tendência observada para a área, a bacia RB11 apresentou o menor perímetro e a bacia RB01 o maior perímetro.

Para a Altitude Média verifica-se que a bacia do Rio Cunha é a bacia menos elevada, estando localizada em uma altitude de pouco mais de 500 m. A altitude nas bacias RB01, RB10 e RB11 está na faixa de 900 a 940 m, sendo a bacia RB11 a mais elevada dentre elas.

O Coeficiente de Compacidade variou de 1,53 a 1,78. A bacia RB10 apresentou o valor mais próximo da unidade, indicando que essa bacia possui o menor nível de irregularidade e sua forma é a mais próxima de um círculo dentre as bacias da área de estudo. Para o Índice de Circularidade os valores apresentados pelas bacias da área de estudo variaram de 0,31 a 0,42. A bacia RB10 foi aquela que apresentou o valor mais próximo da unidade. Isto indica que a forma da bacia RB10 é a que mais se aproxima de um círculo, corroborando o verificado pela avaliação do Coeficiente de Compacidade. O menor valor de Índice de Circularidade foi registrado para a bacia RB01, indicando que essa é a bacia mais alongada.

Para o Fator de Forma a bacia RB01 apresentou o menor valor e a bacia RB10 apresentou o maior valor, com 0,13 e 0,28, respectivamente. Esses resultados indicam que a bacia RB01 possui a menor suscetibilidade à inundação enquanto a bacia RB10 possui maior suscetibilidade dentre as bacias analisadas.

A bacia mais íngreme é a bacia do Rio Cunha com declividade média de 32,49%. Para as bacias RB01, RB10 e RB11 as declividades estão incluídas na faixa de 16 a 19%, sendo a bacia RB11 aquela que apresenta a menor declividade média.

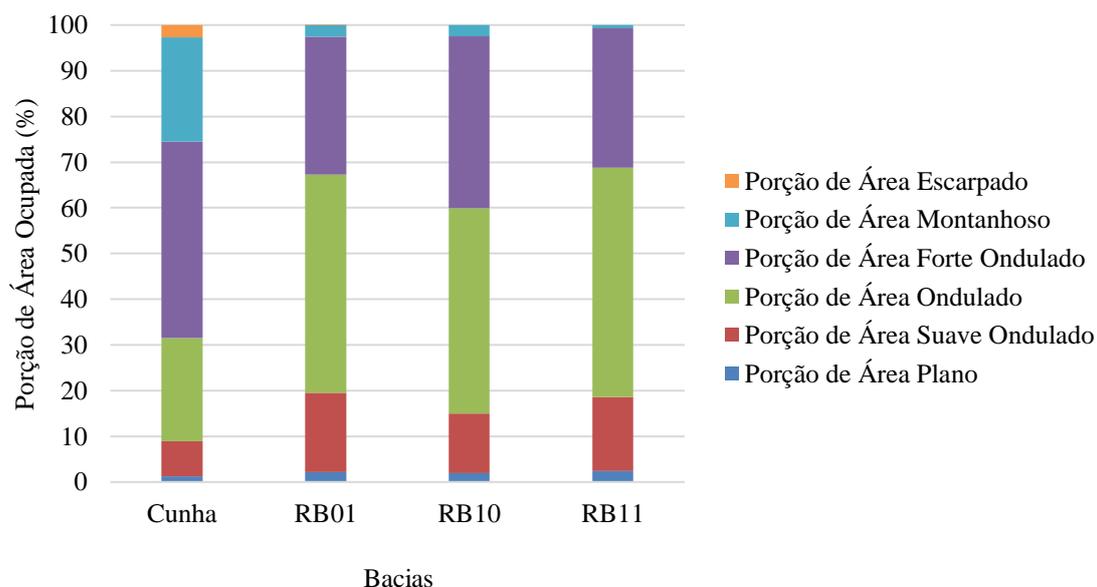
A bacia RB11 apresentou o menor Comprimento Drenagem, com 19,55 km, e a bacia RB10 o maior comprimento, com 154,52 km. Seguindo a mesma tendência observada para o Comprimento de Drenagem, a bacia RB11 apresentou o menor valor de Comprimento de Rio Principal, com 5,09 km, e a bacia RB01 apresentou o maior valor, com 22,26 km.

Os valores de Densidade de Drenagem variaram de 2,40 a 3,24 km.km⁻². Os resultados apontam que a bacia do Rio Cunha é a melhor em termos de drenagem e a bacia RB01 a pior.

Para o Índice de Precipitação Antecedente, nota-se que nos dias imediatamente anteriores a precipitação é pouco expressiva para os eventos analisados.

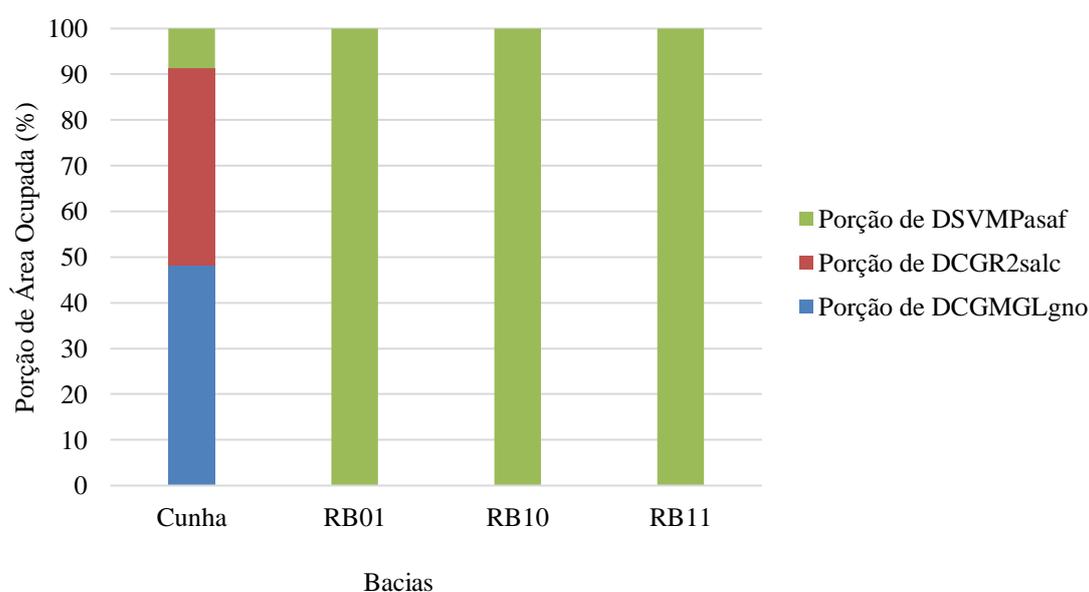
As figuras a seguir mostram a variabilidade espacial das características das bacias hidrográficas da área de estudo relativas à declividade, unidades geológico-ambientais, tipos de solo e usos do solo. A Figura 60 exhibe a proporção de classes de declividade, a Figura 61 exhibe a proporção de unidades geológico-ambientais, a Figura 62 exhibe a proporção de grupos hidrológicos de solo e a Figura 63 exhibe a proporção de usos do solo.

Figura 60 – Proporção de Classes de Declividade (%) nas bacias hidrográficas da área de estudo



A bacia do Rio Cunha apresenta a maior porção de área escarpada. Para as demais bacias essa classe de declividade é inexistente ou inexpressiva. A bacia do Rio Cunha também exibe porção considerável de relevo Montanhoso e Forte Ondulado. Nota-se que o relevo das bacias RB01, RB10 e RB11 é menos acidentado, com declividades mais suaves.

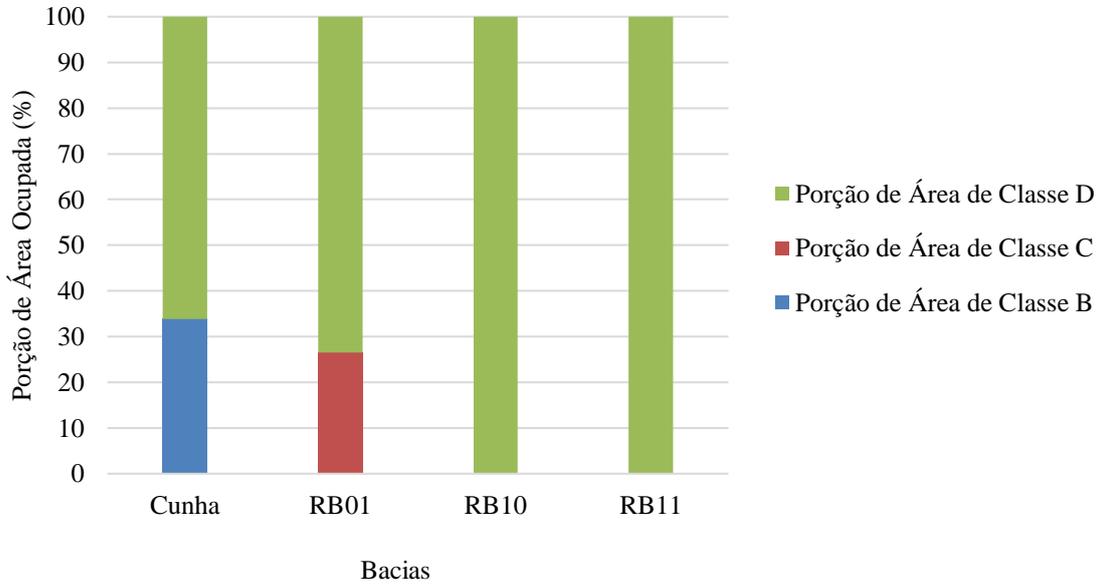
Figura 61 – Proporção de Unidades Geológico-Ambientais (%) nas bacias hidrográficas da área de estudo



A bacia do Rio Cunha é a única que exibe variabilidade quanto às classes de Unidades Geológico-Ambientais. Nessa bacia são encontradas, em ordem crescente de proporção, as classes DCGMGLgno, DCGR2salc e DSVMPasaf. As bacias RB01, RB10 e RB11 apresentam apenas uma classe de Unidade Geológico-Ambientais, do tipo DSVMPasaf. Destaca-se que em

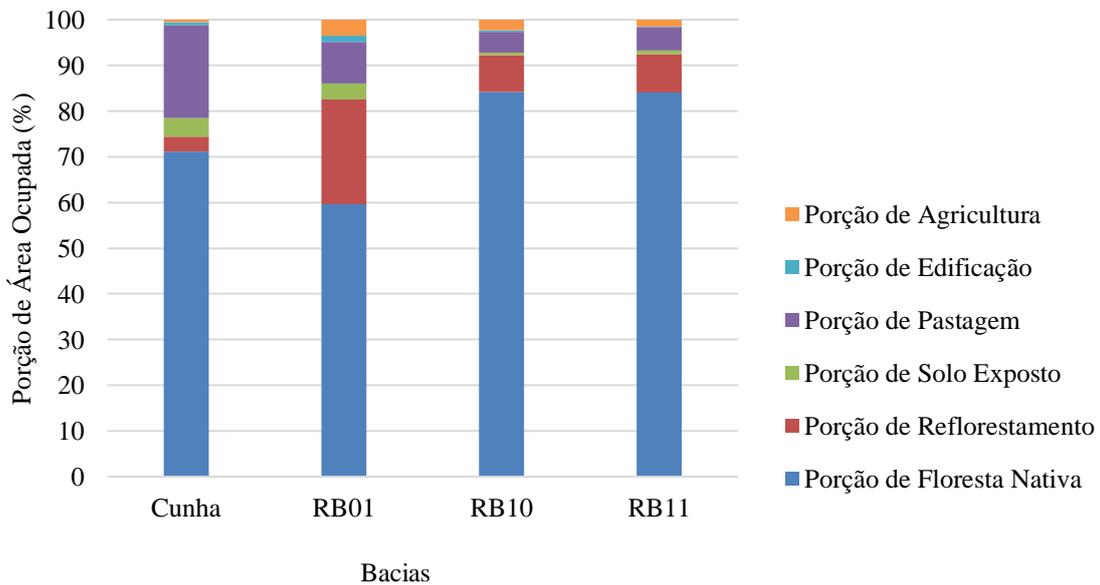
Santa Catarina são encontrados um total de 38 tipos diferentes de Unidades Geológico-Ambientais, entretanto, nas bacias incluídas na área de estudo são verificados apenas três tipos.

Figura 62 – Proporção de Grupos Hidrológicos de Solo (%) nas bacias hidrográficas da área de estudo



A maior parte da área das bacias é formada por solos do Grupo Hidrológico D, caracterizados por alto potencial de escoamento, tendo uma taxa de infiltração muito baixa quando completamente molhados. A bacia do Rio Cunha apresenta uma porção de sua área com solos de Classe B, caracterizados por moderada taxa de infiltração quando completamente molhados. Já a bacia RB01 possui uma porção de sua área com solos de Classe C, caracterizados por apresentar baixa taxa de infiltração quando completamente molhados, principalmente com camadas que dificultam o movimento da água através das camadas superiores para as inferiores.

Figura 63 – Proporção de Usos do Solo (%) nas bacias hidrográficas da área de estudo



A classe de uso do solo mais presente nas bacias da área de estudo é a Floresta Nativa. Considerando a classe de Floresta Nativa somada a classe de Reflorestamento verifica-se que mais de 70% da área das bacias é ocupada por vegetação densa. Para as bacias RB10 e RB11 a proporção de vegetação densa chega a ser superior a 90% da área. A classe de uso do solo menos presente é a Edificação.

5.7. Resultados da análise correlacional

Antes de proceder a regionalização do Tank Model foi realizada uma análise preliminar de correlação para avaliar a relação particular de cada característica da bacia hidrográfica com os parâmetros do modelo. Os valores otimizados dos parâmetros do Tank Model e os valores calculados das métricas utilizadas para descrever as características das bacias foram aplicadas na análise correlacional para verificar a existência de relação linear entre as variáveis e, se existente, o grau e direção da relação.

5.7.1. Correlações dos parâmetros fundamentais

A sequência de figuras, Figura 64, Figura 65, Figura 66, Figura 67, Figura 68, Figura 69, Figura 70 e Figura 71, apresenta os gráficos dos coeficientes de correlação dos parâmetros fundamentais do Tank Model ($A0$, $B0$, $A1$, $A2$, $B1$, $HA1$, $HA2$ e HBI) e as métricas das características da bacia. Nos gráficos, a linha vermelha superior descreve o valor de referência de $R = 0,70$ e a linha vermelha inferior descreve o valor de referência de $R = -0,70$. Os coeficientes de correlação acima da linha vermelha superior exibem alta a muito alta correlação positiva e os coeficientes abaixo da linha vermelha inferior exibem alta a muito alta correlação negativa.

Parâmetro $A0$

A análise correlacional demonstrou que o parâmetro $A0$ possui forte correlação negativa com a Altitude Média, com as porções de área de declividade Plano, Suave Ondulado e Ondulado, com a porção de área de Unidade Geológico-Ambiental do tipo DSVMPasaf e com o uso do solo referente à classe de Agricultura. O parâmetro $A0$ possui forte correlação positiva com a Declividade Média da bacia, com as porções de área de declividade Forte Ondulado, Montanhoso e Escarpado, com a Densidade de Drenagem e com as porções de área de Unidade Geológico-Ambiental do tipo DCGMGLgno e DCGR2salc, com a porção de solo de Classe B e com o uso do solo para a classe de Pastagem.

O parâmetro $A0$ do Tank Model determina a infiltração do primeiro tanque. De acordo com os resultados, bacias mais elevadas geram menor infiltração e bacias com maior Densidade de Drenagem geram maior infiltração. Presume-se que áreas com maior densidade de canais de drenagem sejam bem drenadas, com maior escoamento superficial e, conseqüentemente, menor infiltração. Entretanto, a análise correlacional mostrou tendência inversa ao esperado para esta característica.

Figura 64 – Coeficientes de correlação do parâmetro $A0$

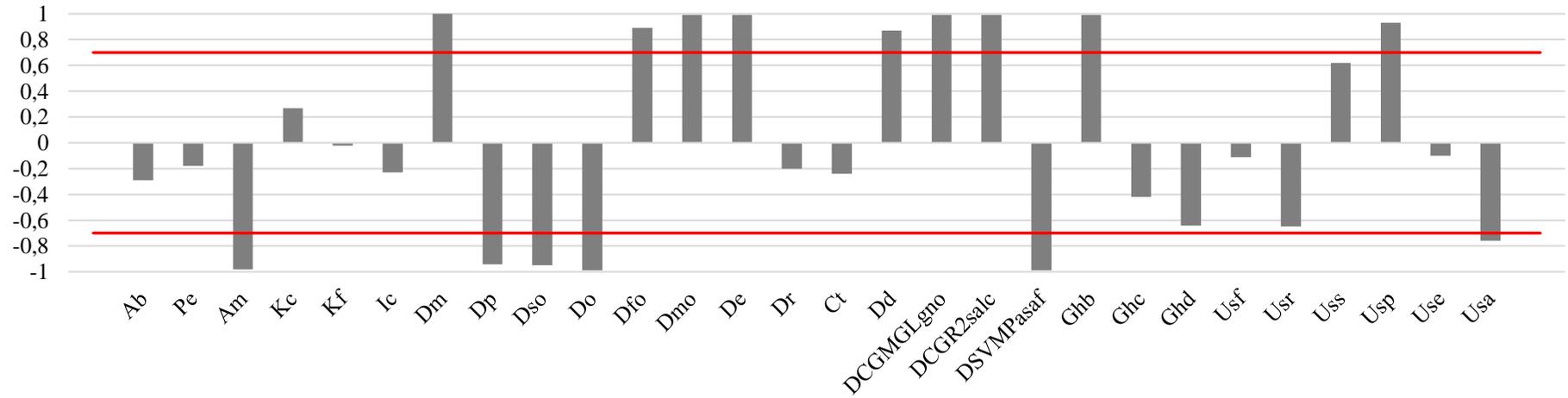


Figura 65 – Coeficientes de correlação do parâmetro $B0$

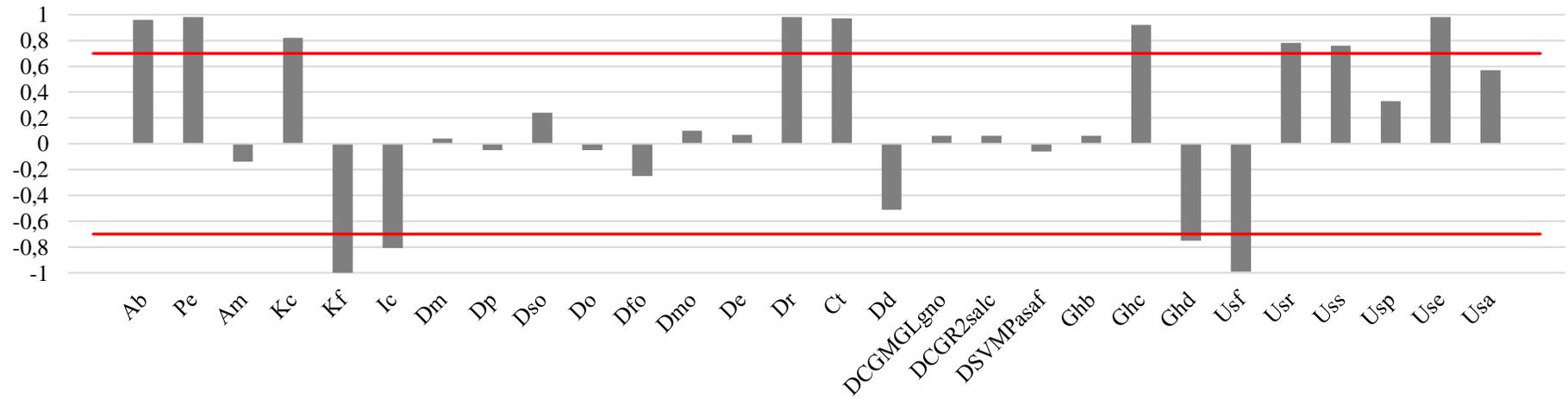


Figura 66 – Coeficientes de correlação do parâmetro A1

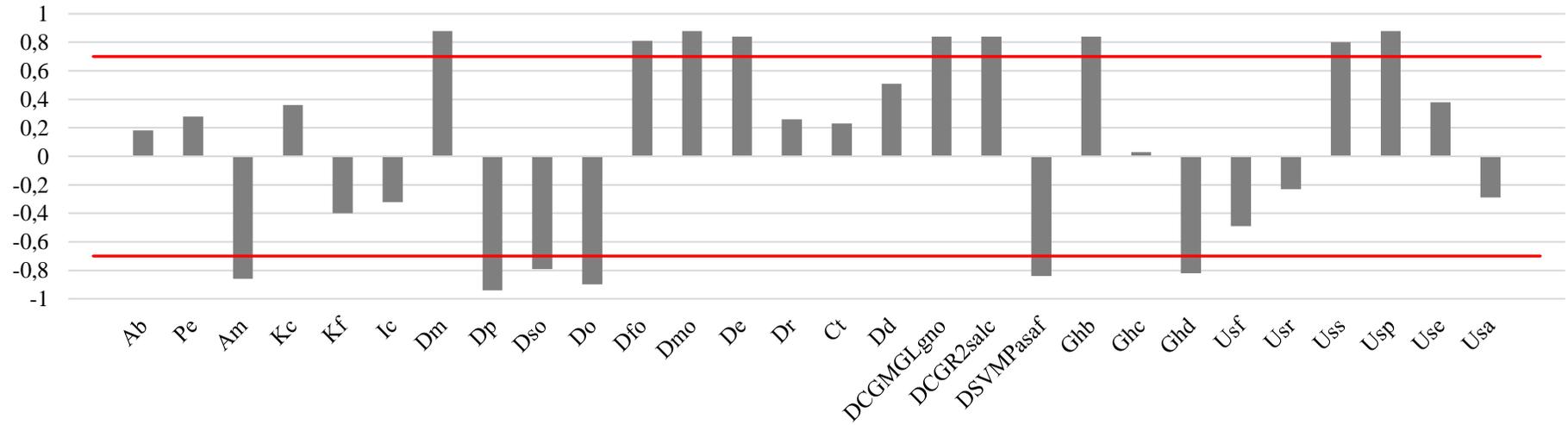


Figura 67 – Coeficientes de correlação do parâmetro A2

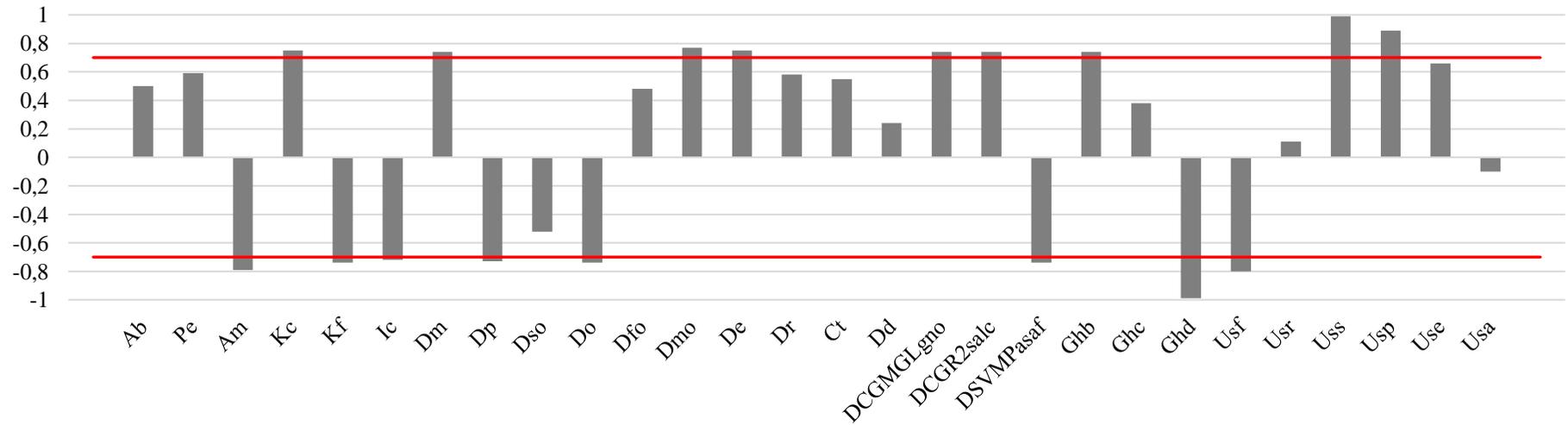


Figura 68 – Coeficientes de correlação do parâmetro *BI*

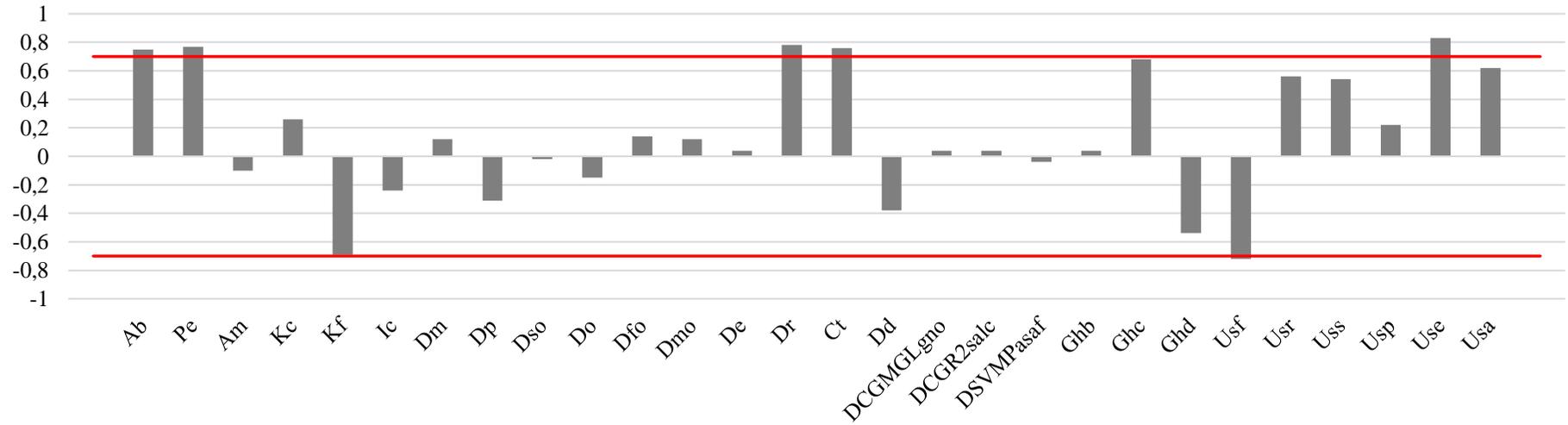


Figura 69 – Coeficientes de correlação do parâmetro *HA1*

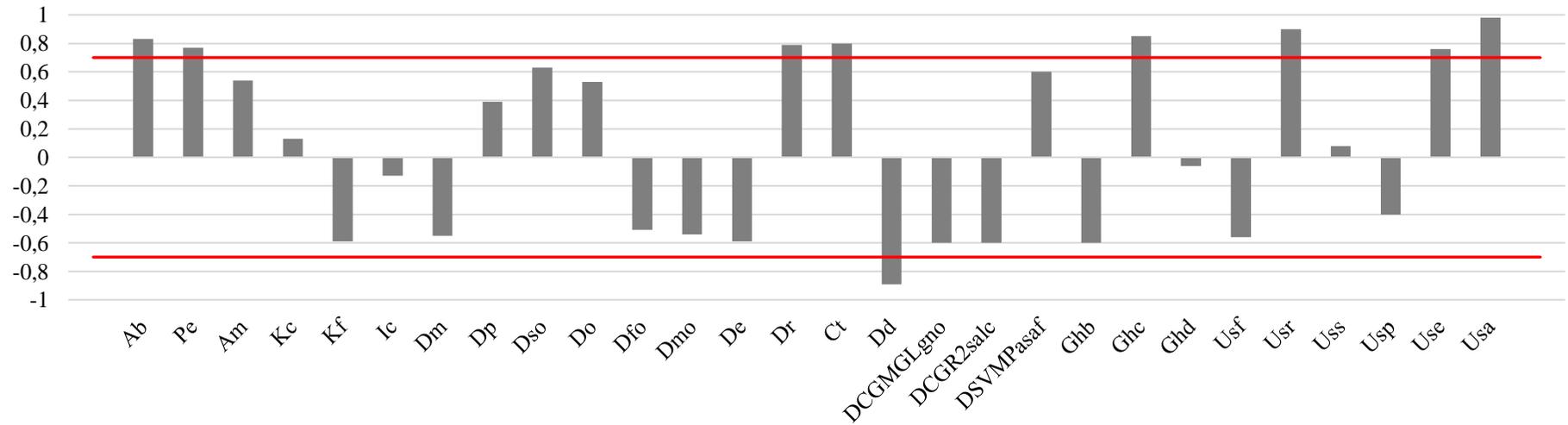


Figura 70 – Coeficientes de correlação do parâmetro *HA2*

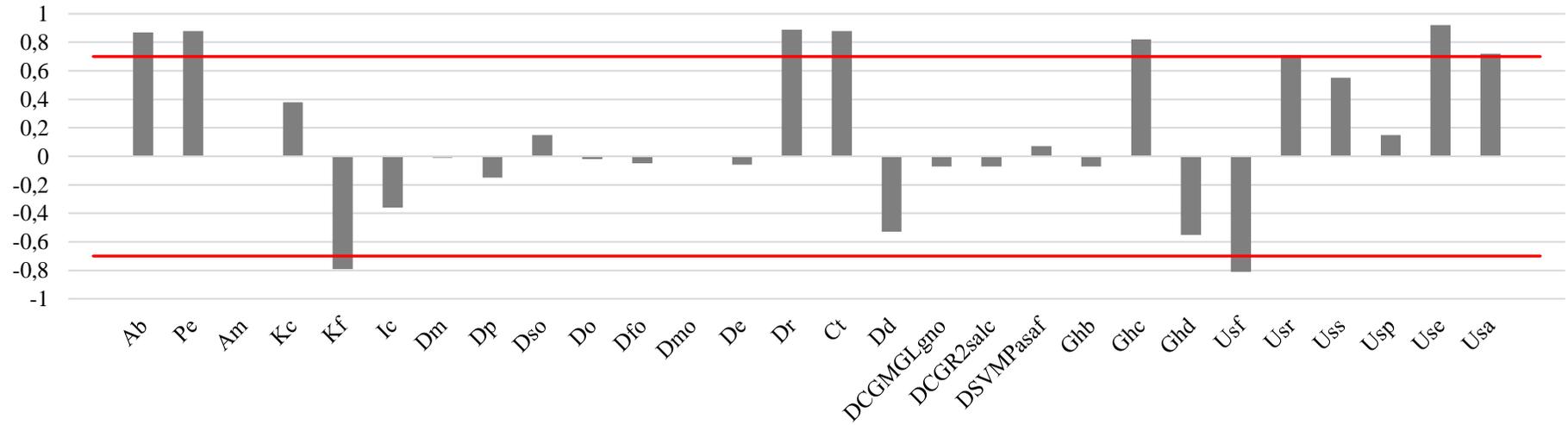
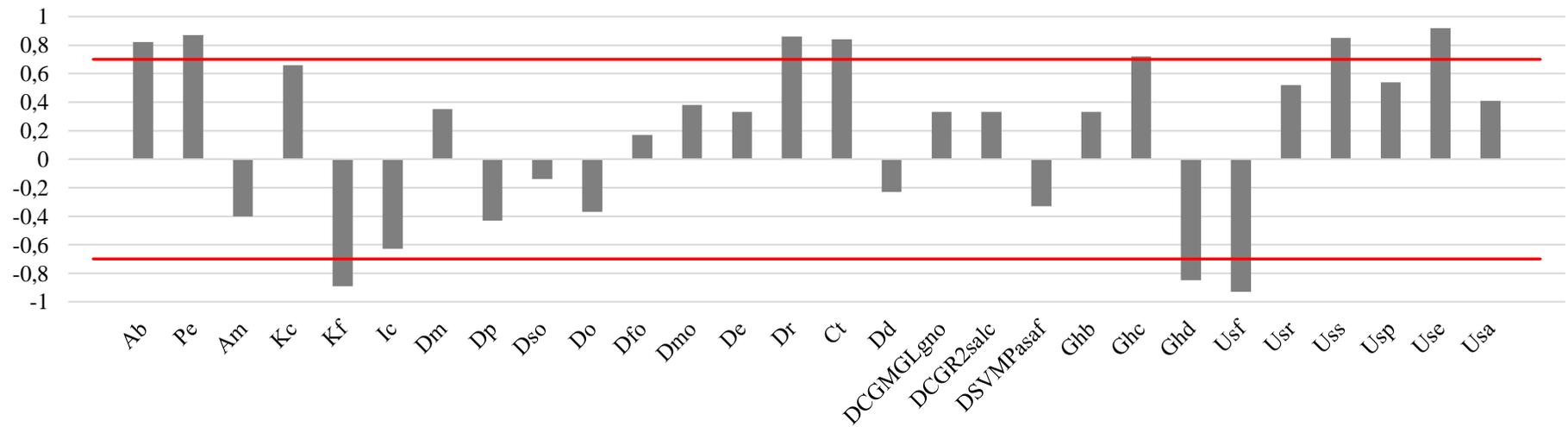


Figura 71 – Coeficientes de correlação do parâmetro *HB1*



O resultado para as porções de Unidade Geológico-Ambientais se mostrou coerente com o comportamento esperado. Bacias com menor porção de área de DSVMPasaf e maior porção de DCGMGLgno ou DCGR2salc tendem a apresentar maior infiltração. Considerando que terrenos de DSVMPasaf são caracterizados por possuir baixa a muito baixa permeabilidade, o resultado de correlação negativa entre $A0$ e essa classe de Unidade Geológico-Ambiental é justificável.

O resultado verificado para as classes de solo também é justificável do ponto de vista físico. Os solos do Grupo Hidrológico Classe B são caracterizados por moderada capacidade de infiltração, sendo maior do que para as classes C e D. A análise de correlação reforça que a presença de maior porção de solo Classe B favorece a ocorrência de infiltração na bacia.

De forma contraintuitiva, os resultados indicam que uma bacia com declividades acentuadas produz maior infiltração, enquanto bacias com relevo suave produzem menor infiltração. O consenso é de que bacias menos íngremes deveriam favorecer a infiltração da água em detrimento ao escoamento superficial.

Os resultados para o uso do solo indicam que as áreas ocupadas por pastagem favorecem a infiltração e as áreas de agricultura prejudicam a infiltração na bacia.

Comparando os resultados com outros autores, os resultados encontrados estão em concordância com Kim e Kim (2004) e An et al. (2015). Esses autores também encontraram correlação positiva entre o parâmetro $A0$ e a Declividade Média da Bacia. Porém, a direção da correlação verificada para a Altitude Média difere do resultado reportado por Kim e Kim (2004), que encontraram correlação positiva entre $A0$ e esta característica.

Parâmetro $B0$

Para o parâmetro $B0$ foi encontrada forte correlação negativa com o Fator de Forma, com o Índice de Circularidade, com a porção de solo de Classe D e com o uso do solo para porção de área de Floresta Nativa. O parâmetro apresentou forte correlação positiva com a Área da Bacia, com o Perímetro da Bacia, com o Coeficiente de Compacidade, com o Comprimento da Rede de Drenagem, com o Comprimento do Rio Principal, com a porção de solo de Classe C e com as porções de uso do solo de Reflorestamento, Solo Exposto e Edificação.

O parâmetro $B0$ controla a infiltração do segundo tanque. Conforme os resultados, verifica-se que bacias com maior Fator de Forma e com maior Índice de Circularidade produzem menor infiltração subsuperficial. Além disso, a análise de correlação demonstrou que bacias com maior área e perímetro, assim como, maior Coeficiente de Compacidade, maior extensão do rio principal e extensão total de canais geram maior infiltração subsuperficial na simulação do modelo. O resultado pode ser explicado do ponto de vista físico considerando que uma bacia com maior dimensão e maior comprimento de canal principal implica em maior tempo para que a água precipitada sobre a bacia alcance o exutório e, assim, há maior chance de ocorrer infiltração.

O resultado observado para a porção de solo de Classe D é esperado tendo em vista que os solos enquadrados nesta classe possuem baixa capacidade de infiltração. Já a correlação positiva com a porção de solo Classe C pode ser explicada pelo fato desse tipo de solo possuir maior capacidade de infiltração do que o solo de Classe D.

A correlação negativa verificada para a porção de floresta nativa pode ser explicada pela ocorrência de interceptação da precipitação pela vegetação, que por sua vez contribui para a menor geração de infiltração. A correlação positiva com o uso do solo para as porções de solo exposto e edificação não encontra explicação física, visto que superfícies ocupadas por estas classes tendem a favorecer o escoamento superficial e não a infiltração.

Kim e Kim (2004) também reportaram correlação positiva entre o parâmetro *BO* e a Área da Bacia. Por outro lado, Kim, Kim e Yoon (2000) e An et al. (2015) encontraram correlação negativa com essa característica.

Parâmetro *AI*

O parâmetro *AI* mostrou forte correlação negativa com a Altitude Média da bacia, com as porções de declividade Plano, Suave Ondulado e Ondulado, com a porção de área de Unidade Geológico-Ambiental do tipo DSVMPasaf e com a porção de solo de Classe D. O parâmetro exibiu forte correlação positiva com a Declividade Média da Bacia, com as porções de declividade Forte Ondulado, Montanhoso e Escarpado, com as porções de Unidade Geológico-Ambiental do tipo DCGMGLgno e DCGR2salc, com a porção de solo de Classe B e com as porções de uso do solo referentes à Solo Exposto e Pastagem.

O parâmetro *AI* está relacionado ao escoamento do primeiro tanque do modelo, atribuído ao fluxo superficial da bacia. Os resultados apontam que uma bacia localizada em altitude mais elevada gera menor escoamento superficial.

Pelos resultados relacionados à declividade da bacia, verifica-se que uma bacia com menor inclinação gera menor escoamento superficial na simulação do modelo.

Quanto maior a porção de área de Unidade Geológico-Ambiental do tipo DSVMPasaf, menor o escoamento superficial e quanto maior as porções de DCGMGLgno e DCGR2salc maior o escoamento.

De forma contraintuitiva, a análise correlacional indica que bacias com maior porção de solo Classe D geram menor escoamento superficial. Seria esperada tendência inversa tendo em vista que os solos desse tipo possuem baixa capacidade de infiltração. Havendo menor infiltração, por compensação, deveria ocorrer maior geração de escoamento superficial. A análise também mostrou que bacias com maior porção de solo Classe B geram maior escoamento, quando era esperada menor geração de escoamento em para essa classe.

Os resultados para as classes de uso do solo apontam que quanto maior as porções de solo exposto e pastagem na superfície da bacia maior o escoamento superficial.

Os resultados verificados para Altitude Média e Declividade Média da Bacia estão em concordância com outros autores. Para o parâmetro *AI*, Kim e Kim (2004) encontraram correlação negativa com a Altitude Média da bacia e correlação positiva com a Declividade Média da Bacia. Além desses autores, Kim, Kim e Yoon (2000) e An et al. (2015) também relataram correlação positiva com a Declividade Média da Bacia.

Parâmetro *A2*

Para o parâmetro *A2* foi verificada forte correlação negativa com a Altitude Média da bacia, Fator de Forma, Índice de Circularidade, com as porções de declividade Plano e Ondulado, com a porção de Unidade Geológico-Ambiental do tipo DSVMPasaf, com a porção

de solo de Classe D e com a porção de uso do solo para a classe de Floresta Nativa. O parâmetro apresentou forte correlação positiva com o Coeficiente de Compacidade, com a Declividade Média da bacia, com as porções de declividade Montanhoso e Escarpado, com as porções de Unidade Geológico-Ambiental do tipo DCGMGLgno e DCGR2salc, com a porção de solo de Classe B e com as porções de uso do solo de Solo Exposto e Pastagem.

O parâmetro *A2* também está relacionado ao escoamento do primeiro tanque do modelo, atribuído ao fluxo superficial. Em concordância com o resultado verificado para o parâmetro *A1*, a análise correlacional para o parâmetro *A2* indica que bacias mais elevadas geram menor escoamento. Além disso, os resultados para *A2* indicam que bacias com maior Fator de Forma e Índice de Circularidade geram menor escoamento superficial e bacias com maior Coeficiente de Compacidade geram maior escoamento.

Para as características relacionadas à declividade, Unidade Geológico-Ambiental e tipo de solo, as correlações do parâmetro *A2* seguem a mesma tendência observada para o parâmetro *A1*.

Quanto ao uso do solo, a análise de correlação aponta que a presença de maior porção de floresta nativa gera menor escoamento superficial, enquanto maior porção de solo exposto e pastagem favorece a geração de escoamento superficial.

A direção da correlação entre o parâmetro *A2* e as características relativas ao Fator de Forma e à Declividade Média da Bacia concordam com os resultados reportados por Lee e Kang (2007) e Kim e Kim (2004). Lee e Kang (2007) também encontraram correlação negativa com o Fator de Forma da bacia e Kim e Kim (2004) verificaram correlação positiva com a Declividade Média da Bacia. Por outro lado, para Kim e Kim (2004) a correlação entre *A2* e a Altitude Média da bacia foi positiva e para An et al. (2015) a correlação entre o parâmetro e a Declividade Média da Bacia foi negativa.

Parâmetro *B1*

O parâmetro *B1* exibiu forte correlação negativa com a porção de uso do solo de Floresta Nativa e forte correlação positiva com a Área da Bacia, com o Perímetro da Bacia, com o Comprimento da Rede de Drenagem, com o Comprimento do Rio Principal e com a porção de uso do solo para a classe de Edificação.

O parâmetro *B1* determina o escoamento do segundo tanque, atribuído ao fluxo subsuperficial. Os resultados indicam que bacias de maiores dimensões em termos de área e perímetro, com maior comprimento da rede de drenagem e também do rio principal, geram maior escoamento subsuperficial. Uma bacia com maior dimensão permite maior infiltração de água antes de alcançar o exutório, abastecendo o subsolo da bacia, onde a água infiltrada pode fluir na forma de escoamento subsuperficial.

A presença de maior área ocupada por Floresta Nativa gera menor escoamento subsuperficial e maior área ocupada por Edificação gera maior escoamento. O resultado observado para a classe de uso do solo referente à Edificação vai contra o esperado visto que essa forma de ocupação está relacionada à impermeabilização da superfície da bacia, fator que reduz ou impede o fluxo da água em camadas subsuperficiais.

Como verificado nesse trabalho, Huh, Park e Im (1993) e Kang, Lee e Park (2013) também encontraram correlação positiva entre o parâmetro *B1* e a área da bacia. Contudo, Kim,

Kim e Yoon (2000) e Kim e Kim (2004) reportaram que esse coeficiente possui correlação negativa com a área da bacia.

Parâmetro *HAI*

O parâmetro *HAI* apresentou forte correlação negativa com a Densidade de Drenagem e forte correlação positiva com a Área da Bacia, com o Perímetro da Bacia, com o Comprimento da Rede de Drenagem, com o Comprimento do Rio Principal, com a porção de solo de Classe C e com as porções de uso do solo referentes às classes de Reflorestamento, Edificação e Agricultura.

O parâmetro *HAI* determina a altura da saída lateral inferior do primeiro tanque e está relacionado ao armazenamento na superfície da bacia. Os resultados apontam que uma bacia com maior Densidade de Drenagem armazena menor quantidade de água na superfície da bacia. A direção da correlação verificada para a Densidade de Drenagem está de acordo com o esperado, pois maior densidade de drenagem implica em maior capacidade de escoar a água superficial e, conseqüentemente, menor armazenamento.

Além disso, verifica-se que bacias com maior tamanho e perímetro, assim como, maior Comprimento da Rede de Drenagem e também maior Comprimento do Rio Principal, possuem maior altura de saída lateral e são capazes de armazenar maior quantidade de água.

A presença de maior porção de solo de classe C e maior porções de uso do solo para as classes de Reflorestamento, Edificação e Agricultura, geram maior altura da saída lateral. Espera-se que áreas com vegetação densa interceptem e armazenem água da precipitação, mas a correlação observada para a classe de edificação não pode ser fisicamente embasada visto que essa classe está associada à impermeabilização da superfície da bacia e à geração de escoamento superficial.

Kim, Kim e Yoon (2000) também verificaram correlação positiva entre a altura *HAI* e o Comprimento do Rio Principal. Huh, Park e Im (1993) e Kang, Lee e Park (2013) também reportaram correlação positiva entre *HAI* e a Área da Bacia. Entretanto, Kim e Kim (2004) e An et al. (2015) relataram correlação negativa com essa característica.

Parâmetro *HA2*

O parâmetro *HA2* exibiu forte correlação negativa com o Fator de Forma e com o uso do solo para a classe de Floresta Nativa. Assim como verificado para *HAI*, o parâmetro *HA2* apresentou forte correlação positiva com a Área da Bacia, com o Perímetro da Bacia, com o Comprimento da Rede de Drenagem, com o Comprimento do Rio Principal, com a porção de solo de Classe C e com as porções de uso do solo referentes às classes de Reflorestamento, Edificação e Agricultura.

O parâmetro *HA2* determina a altura da saída lateral superior do primeiro tanque e também está relacionado ao armazenamento na superfície da bacia. Os resultados da análise correlacional para o parâmetro *HA2* seguem a tendência observada para o parâmetro *HAI*. Por outro lado, para a altura *HA2* os resultados apontam que bacias com maior Fator de Forma possuem menor altura de armazenamento.

Além disso, a presença de maior porção de Floresta Nativa gera menor altura de armazenamento, enquanto maior porção de Reflorestamento, Edificação e Agricultura

favorecem maior altura. Espera-se que em áreas ocupadas por floresta, cuja vegetação é densa, a capacidade de armazenamento seja grande e que em áreas ocupadas por edificação ocorra menor armazenamento devido à impermeabilização das superfícies da bacia. Yokoo et al. (2001) concordam com a afirmação. Os autores reportaram que em regiões onde o uso do solo possui alta capacidade de armazenamento, tal como áreas ocupadas por floresta, as alturas de armazenamento tendem a ser maiores.

Como verificado nesse trabalho, Huh, Park e Im (1993) também encontraram correlação positiva entre a altura *HA2* e o Fator de Forma da bacia. Kim e Park (1988), Kim e Kim (2004), Kang, Lee e Park (2013) e An et al. (2015) também verificaram que o parâmetro *HA2* possui correlação positiva com a área da bacia, mas Kim, Kim e Yoon (2000) reportaram correlação negativa. Além disso, diferentemente do verificado para esse trabalho, Kang, Lee e Park (2013) reportaram correlação negativa entre a altura *HA2* e o Comprimento do Rio Principal.

Parâmetro *HBI*

Para o parâmetro *HBI* foi verificada forte correlação negativa com o Fator de Forma, com a porção de solo de Classe D e com a porção de uso do solo para a classe de Floresta Nativa. O parâmetro apresentou forte correlação positiva com a Área da Bacia, com o Perímetro da Bacia, com o Comprimento da Rede de Drenagem, com o Comprimento do Rio Principal, com a porção de solo de Classe C e com as porções de uso do solo referentes às classes de Solo Exposto e Edificação.

O parâmetro *HBI* determina a altura da saída lateral do segundo tanque e está relacionado ao armazenamento subsuperficial. Os resultados indicam que uma bacia com maior Fator de Forma possui menor capacidade de armazenamento subsuperficial. Além do mais, para as bacias com maior área e perímetro, assim como, maior comprimento total de canais e maior extensão do rio principal, a altura da saída lateral do segundo tanque tende a ser maior, indicando maior capacidade de armazenamento.

A presença de maior porção de solo de Classe D diminui a capacidade de armazenamento subsuperficial da bacia. Esse resultado pode ser explicado pela baixa capacidade de infiltração de solos dessa classe. Já a presença de maior porção de solo de Classe C favorece o armazenamento.

Bacias com maior área ocupada por Floresta Nativa possuem menor capacidade de armazenamento subsuperficial, enquanto bacias ocupadas por maiores porções de Solo Exposto e Edificação possuem maior capacidade de armazenamento. Assim como discutido sobre a tendência observada para o parâmetro *HAI*, o resultado encontrado para a classe de Floresta Nativa pode ser atribuído à ocorrência de interceptação, porém, a correlação positiva entre *HA2* e a porção de edificação não pode ser fisicamente embasada.

Huh, Park e Im (1993), Kim, Kim e Yoon (2000) e Kang, Lee e Park (2013) também encontraram correlação positiva entre *HBI* e a Área da Bacia, mas Kim e Kim (2004) verificaram correlação negativa. Além disso, Huh, Park e Im (1993) e Kang, Lee e Park (2013) obtiveram correlação negativa entre a altura da saída do segundo tanque e o Comprimento do Rio Principal, diferentemente do resultado encontrado nesse trabalho.

Considerações gerais

Nesse trabalho foram utilizadas métricas não consideradas em trabalhos precedentes, tais como Comprimento da Rede de Drenagem, Índice de Circularidade e Coeficiente de Compacidade, além das especificidades locais referentes aos tipos de formações geológicas e tipos de solo. Os tipos de formações geológicas foram descritos em termos de classes de unidades geológico-ambientais e os tipos de solo foram descritos em termos de grupos hidrológicos. Para estas métricas as particularidades da metodologia aplicada dificultaram a comparação dos resultados obtidos com outros trabalhos. Por outro lado, as métricas utilizadas se mostraram relevantes como descritores das características da bacia hidrográfica para regionalização do Tank Model.

As métricas referentes à Área da Bacia, Perímetro da Bacia, Altitude Média, Fator de Forma, Declividade, Comprimento do Rio Principal e Uso do Solo também se mostraram relevantes para a regionalização do Tank Model, corroborando os trabalhos precedentes.

No APÊNDICE N são apresentadas as matrizes de correlação das métricas das características da bacia hidrográfica utilizadas na análise de regressão dos parâmetros fundamentais do Tank Model.

A análise correlacional entre as métricas das características da bacia mostrou que algumas características da bacia possuem muito alto grau de correlação entre si ($|R| > 0,90$).

Nota-se muito alto grau de correlação entre as métricas de Área da Bacia, Perímetro da Bacia, Fator de Forma, Comprimento da Rede de Drenagem e de Comprimento do Rio Principal. Essas métricas também apresentaram muito alta correlação com o solo de Classe C e com as classes de uso do solo de Floresta Nativa, Reflorestamento e Edificação.

A Altitude Média apresentou alto grau de correlação com as métricas relacionadas à declividade da bacia, com as classes de Unidade Geológico-Ambiental, com o solo de Classe B e com o uso do solo para a classe de Pastagem.

Foi verificada elevada correlação entre a Densidade de Drenagem e o uso do solo para as classes de Reflorestamento e Agricultura.

Como esperado, o Coeficiente de Compacidade e o Índice de Circularidade mostraram muito alta correlação entre si.

A classe de uso do solo de Pastagem apresentou muito alta correlação com a Declividade Média da bacia e também com as classes de declividade Ondulado, Montanhoso e Escarpado. Esse resultado pode ser indicativo de que o relevo da bacia é fator determinante para o desenvolvimento desse tipo de uso do solo.

As classes de declividade, por sua vez, também apresentaram alta correlação com as classes de unidades geológico-ambientais e com o solo de Classe B.

As métricas das características relativas à declividade, formações geológicas, tipos de solo e usos do solo foram calculadas em termos de proporção de área ocupada. Devido à propriedade de complementariedade é esperado que as classes de cada um desses grupos de características demonstrem correlação elevada entre si.

O alto grau de correlação das métricas das características entre si aponta que algumas delas podem ser desconsideradas na etapa de regionalização. Por exemplo, se utilizada a Área da Bacia para explicar um determinado parâmetro do Tank Model, o Perímetro da Bacia poderia ser descartado da análise de regressão múltipla. Tendo em vista que a Área da Bacia e o

Perímetro da Bacia possuem muito alto grau de correlação entre si, a Área da Bacia já seria suficiente para explicar um determinado parâmetro do Tank Model.

5.7.2. Correlações dos parâmetros relacionados ao armazenamento inicial

A Figura 72 e a Figura 73 apresentam os gráficos dos coeficientes de correlação dos parâmetros relacionados ao armazenamento inicial dos tanques (*S1* e *S2*). Nos gráficos, a linha vermelha superior descreve o valor de referência de $R = 0,70$ e a linha vermelha inferior descreve o valor de referência de $R = -0,70$.

Parâmetro *S1*

O parâmetro *S1* exibiu forte correlação positiva com a Densidade de Drenagem e forte correlação negativa com o uso do solo para a classe de Agricultura. A análise correlacional indica que a altura de armazenamento inicial do primeiro tanque é maior para bacias mais bem drenadas e com menor porção de agricultura.

Parâmetro *S2*

O parâmetro *S2* não apresentou correlação forte com as características avaliadas. O melhor desempenho foi observado para a classe de declividade Plano ($R = 0,61$). A direção da correlação aponta que a altura de armazenamento inicial do segundo tanque tende a ser maior para bacias com maior área de relevo plano.

Considerações gerais

Os coeficientes de correlação entre o parâmetro *S1* e os Índices de Precipitação Antecedente ficaram inseridos na faixa de 0,30 a 0,50, sendo classificados como valores de correlação baixos. Para o parâmetro *S2* os coeficientes de correlação ficaram na faixa de -0,30 a 0,00, sendo classificados como valores de correlação desprezíveis. Dados esses resultados, a aplicação do Índice de Precipitação Antecedente para explicar a altura inicial de armazenamento nos tanques pode ser considerada insatisfatória.

A análise correlacional das métricas das características da bacia hidrográfica utilizadas na análise de regressão dos parâmetros de armazenamento demonstra que os Índices de Precipitação Antecedente possuem correlação alta a muito alta entre si (APÊNDICE N). Dessa forma, a aplicação de apenas um dos índices já seria suficiente para a regionalização dos parâmetros de armazenamento do Tank Model.

Dado o baixo desempenho da simulação de descarga de sedimentos, o evento (7) da bacia RB01 foi desconsiderado na análise correlacional dos parâmetros relacionados à condição inicial de sedimentos (*X* e *SMI*).

Figura 72 – Coeficientes de correlação do parâmetro *S1*

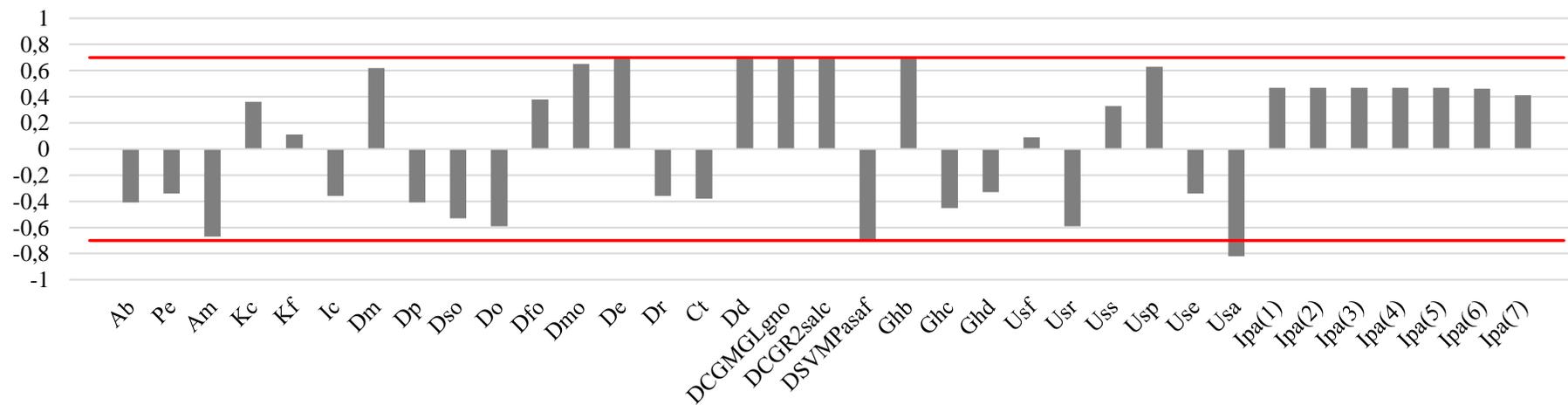
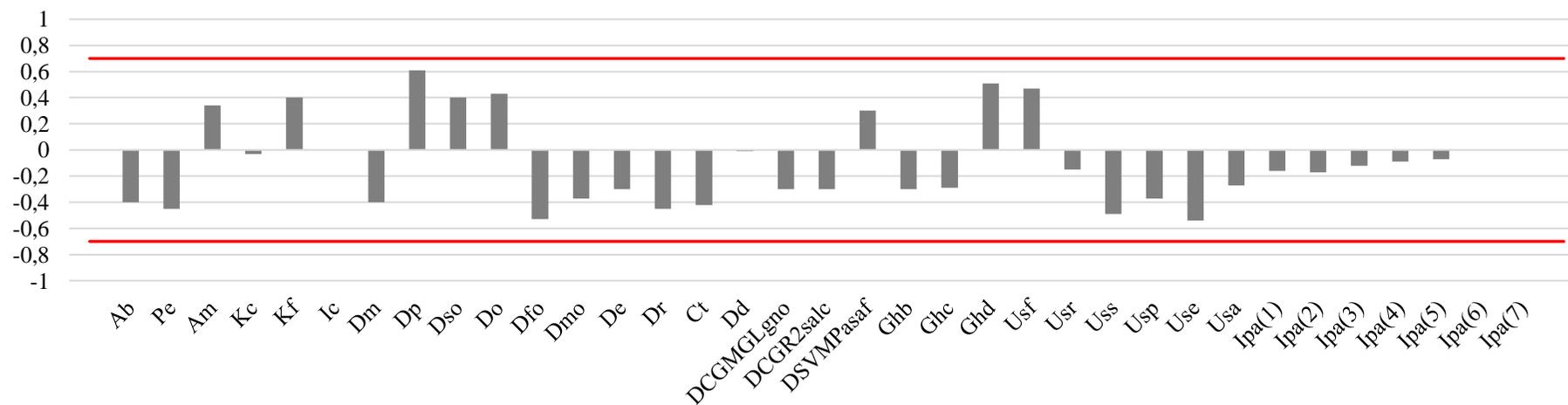


Figura 73 – Coeficientes de correlação do parâmetro *S2*



5.7.3. Correlações dos parâmetros relacionados à condição inicial de sedimentos

A Figura 74 e a Figura 75 apresentam os gráficos dos coeficientes de correlação dos parâmetros dos parâmetros relacionados à condição inicial de sedimentos no tanque (X e SMI). Nos gráficos, a linha vermelha superior descreve o valor de referência de $R = 0,70$ e a linha vermelha inferior descreve o valor de referência de $R = -0,70$.

Parâmetro X

A análise correlacional demonstrou que o parâmetro X possui forte correlação negativa com a Altitude Média, com as porções de área de declividade Plano, Suave Ondulado e Ondulado, com a porção de área de Unidade Geológico-Ambiental do tipo DSVMPasaf, com a porção de solo de Classe D e com o uso do solo referente à classe de Agricultura. O parâmetro X apresenta forte correlação positiva com a Declividade Média da bacia, com as porções de área de declividade Forte Ondulado, Montanhoso e Escarpado, com a Densidade de Drenagem e com as porções de área de Unidade Geológico-Ambiental do tipo DCGMGLgno e DCGR2salc, com a porção de solo de Classe B e com o uso do solo para as classes de Solo Exposto e de Pastagem. Também foi verificada forte correlação positiva entre o parâmetro e os Índices de Precipitação para Sedimentos.

O parâmetro X do Tank Model modificado está relacionado à concentração de sedimentos na superfície da bacia, determinando o grau de aporte de sedimentos na simulação da descarga de sedimentos. De acordo com os resultados, bacias mais elevadas possuem menor concentração de sedimentos e bacias com maior Densidade de Drenagem possuem maior concentração de sedimentos.

Quanto à declividade, os resultados indicam que uma bacia com declividades mais acentuadas possui maior concentração de sedimentos, enquanto uma bacia com relevo suave possui menor concentração de sedimentos. Esta tendência é justificável tendo que vista que a inclinação é um fator que pode potencializar a erosão de terrenos.

O resultado para as porções de Unidade Geológico-Ambientais indica que bacias com menor porção de área de DSVMPasaf e maior porção de DCGMGLgno ou DCGR2salc tendem a apresentar maior concentração de sedimentos em sua superfície. Considerando as características de cada Unidade Geológico-Ambiental, os resultados da análise de correlação podem ser considerados coerentes. Os sedimentos presentes na unidade DSVMPasaf costumam ser finamente laminados ou maciços, rijos e de alta cerosidade, bastante suscetíveis à erosão em terrenos alterados, tal como taludes de cortes. Já as unidades do tipo DCGR2salc e DCGMGLgno são caracterizadas por apresentar terrenos sujeitos à erosão nas áreas mais declivosas. A bacia do Rio Cunha é aquela que apresenta as porções de área mais declivosas dentre as bacias que compõem a área de estudo e é também a única bacia que apresenta porções de unidades DCGR2salc e DCGMGLgno. Tendo em vista a associação das características de declividade e unidades geológico-ambientais na bacia do Rio Cunha, é esperado que essa bacia apresente os maiores valores de concentração de sedimentos em sua superfície. Avaliando os valores otimizados do parâmetro X exibidos na Tabela 32 para os eventos hidrossedimentológicos da bacia do Rio Cunha, verifica-se que é justamente isso que ocorre.

Figura 74 – Coeficientes de correlação do parâmetro *X*

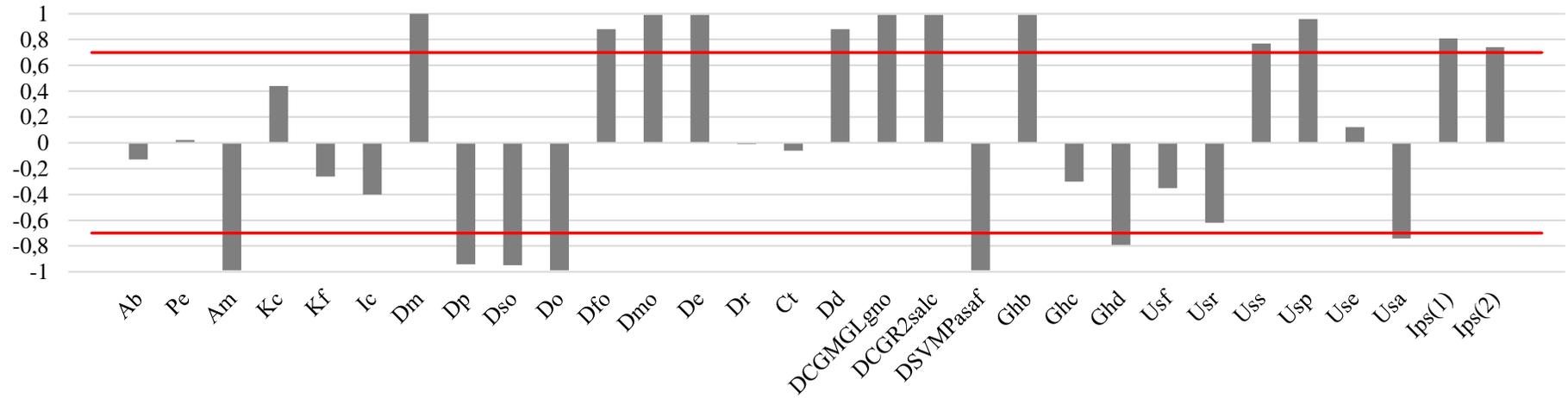
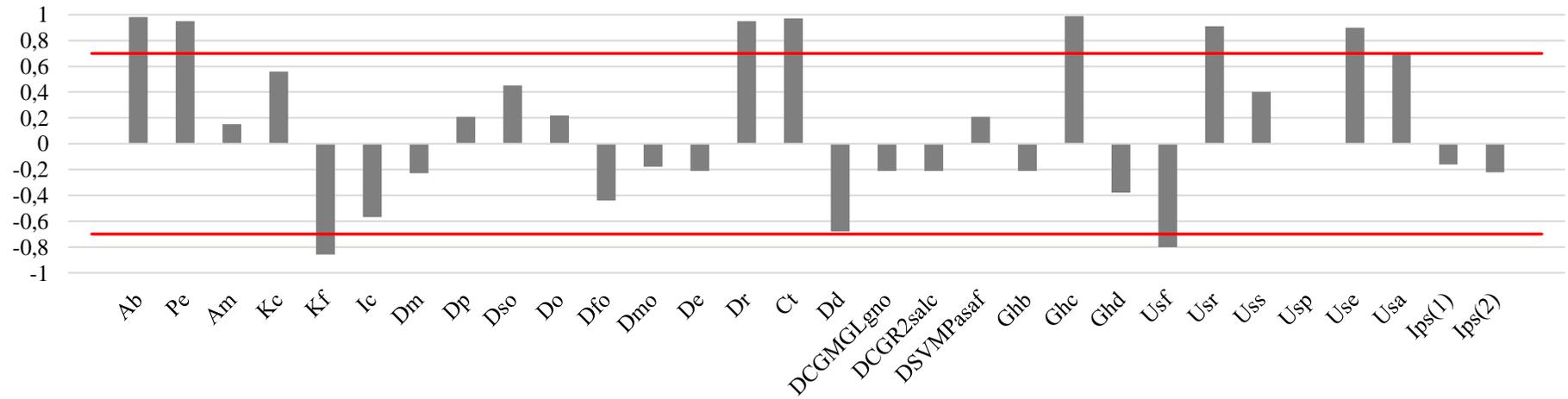


Figura 75 – Coeficientes de correlação do parâmetro *SMI*



A presença de menor porção de solo de Classe D e maior porção de solo de Classe B favorece a ocorrência de maior concentração de sedimentos na superfície da bacia.

Os resultados para o uso do solo indicam que as bacias ocupadas por maior porção de Pastagem e Solo Exposto apresentam maior concentração de sedimentos, enquanto bacias ocupadas por maior porção de Agricultura apresentam menor concentração de sedimentos.

A direção da correlação observada para os Índices de Precipitação para Sedimentos também se mostrou coerente. Os índices são calculados para representar a disponibilidade de sedimentos na superfície da bacia e os resultados mostram que quanto maior o seu valor, maior a concentração de sedimentos na bacia.

Parâmetro *SMI*

Para o parâmetro *SMI* verifica-se forte correlação negativa com o Fator de Forma e com o uso do solo para a classe de Floresta Nativa. Há forte correlação positiva com a Área e o Perímetro da Bacia, com os comprimentos da Rede de Drenagem e do Rio Principal, com o solo de Classe C e com as porções de uso do solo relativas às classes de Reflorestamento, Edificação e Agricultura.

O parâmetro *SMI* do Tank Model modificado representa a massa sedimentos inicial do primeiro tanque. Os resultados demonstram que uma bacia com maior Fator de Forma tende a apresentar menor quantidade de massa de sedimentos no primeiro tanque, enquanto uma bacia com maiores dimensões e com maior porção de solo de Classe C tende a apresentar maior quantidade de massa de sedimentos. Além disso, o valor otimizado do parâmetro *SMI* tende a ser maior quanto menor for a porção de Floresta Nativa e maior forem as porções de Reflorestamento, Edificação e Agricultura.

Os Índices de Precipitação para Sedimentos não foram capazes de explicar a massa inicial de sedimento do tanque, haja visto os baixos coeficientes de correlação.

Considerações gerais

Conforme o APÊNDICE N, a análise correlacional demonstra que os Índices de Precipitação para Sedimentos possuem correlação muito alta entre si ($|R| > 0,90$). Dessa forma, a aplicação de apenas um dos índices já seria suficiente para a regionalização dos parâmetros do Tank Model relacionados às condições iniciais de sedimentos.

5.8. Resultados da regionalização do Tank Model

Para desenvolver a regionalização dos parâmetros do Tank Model foram observados os resultados da análise preliminar de correlação entre cada característica da bacia e os parâmetros do modelo. As características definidas como aptas para a etapa de regressão foram aquelas que apresentaram correlação significativa na análise preliminar ($|R| > 0,30$).

O método de regressão linear múltipla foi aplicado para regionalização. As características da bacia foram inseridas como variáveis independentes e os parâmetros do Tank Model foram inseridos como variáveis dependentes. A aplicação do modelo de regressão linear múltipla pressupõe que os parâmetros do Tank Model podem ser explicados pelas

características da bacia. Nesta etapa foi utilizado o software TIBCO® Statistica™ 10.0. e a análise foi do tipo Forward Stepwise.

A Tabela 39 apresenta as equações de regionalização do Tank Model para cada parâmetro do modelo. Na tabela também são exibidos os resultados de Coeficiente de Determinação (R^2), assim como o valor-p para cada equação.

Tabela 39 – Equações de regionalização do Tank Model para simulação de escoamento e descarga de sedimentos

Parâmetros	Equações de Regionalização	R^2	Valor-p
$A0$	$- 0,02862 + 0,00178Dm$	0,98	$p < 0,00464$
$B0$	$0,00136 - 0,00358Kf$	0,99	$p < 0,00276$
$A1$	$0,001947 - 0,000774Dp + 0,000278Use$	0,99	$p < 0,01909$
$A2$	$0,18777 - 0,00182Ghd$	0,98	$p < 0,00825$
$B1$	$0,0001357 + 0,0000391Usa - 0,0000747Dp$	0,99	$p < 0,02300$
$HA1$	$0,748 + 4,905Usa$	0,96	$p < 0,01878$
$HA2$	$413,165 - 1,931Usf - 131,825Kc$	0,99	$p < 0,00058$
HBI	$11,927 + 96,488Use - 4,821Ct$	0,99	$p < 0,02609$
$S1$	$1,876 - 1,200Usa + 0,108Usr$	0,88	$p < 0,00467$
$S2$	$- 3223,303 + 693,107Dp + 107,038Dm - 45,549Dmo$	0,98	$p < 0,00061$
X	$- 7,730 + 0,457Dm$	0,99	$p < 0,00000$
$SM1$	$14,870 + 12,417Ghc$	0,98	$p < 0,00001$

Considerando os indicadores de qualidade da regressão linear múltipla em termos dos valores de R^2 e valor-p, verifica-se excelente ajuste das equações de regressão.

Os parâmetros $A0$, $B0$, $A1$, $A2$, $B1$, $HA2$, HBI , $S2$, X e $SM1$ apresentaram excelentes valores de R^2 , acima de 0,98. Nesses casos, as equações de regionalização são capazes de explicar 98% ou mais da variação de cada parâmetro. Para os parâmetros $HA1$ e $S1$ o desempenho foi um pouco inferior, mas ainda assim, muito bom. O parâmetro $HA1$ apresentou R^2 de 0,88 e o parâmetro $S1$ apresentou R^2 de 0,96. Nesses casos, as equações de regionalização são capazes de explicar 88% e 96% da variação dos parâmetros $HA1$ e $S1$, respectivamente.

A significância estatística global da regressão foi satisfatória. Nota-se que os resultados de valor-p foram inferiores a 5% ($p < 0,05$) para todos os parâmetros, indicando que as variáveis independentes (características da bacia) estão significativamente predizendo as variáveis dependentes (parâmetros do Tank Model).

Os resultados gerais da regressão linear múltipla para cada parâmetro são apresentados no APÊNDICE O. Analisando a significância estatística individualmente para cada variável independente, verifica-se que a predição fornecida pelas características da bacia é estatisticamente significativa ao nível de 5%, para todos os casos.

As métricas mais relevantes para explicar os parâmetros do Tank Model estão relacionadas às características de relevo, tipo de solo e uso do solo da bacia. As características do relevo da bacia aparecem representadas pelas métricas de Declividade Média e porções de declividade das classes Plano e Montanhoso. As características do solo estão representadas pelas métricas que quantificam as porções de solo dos Grupos Hidrológicos de Classe C e Classe D. E as características do uso do solo estão representadas pelas métricas que quantificam as porções de área ocupadas pelas classes de Agricultura, Edificação, Floresta Nativa e Reflorestamento. Trabalhos precedentes que desenvolveram a regionalização do Tank Model verificaram que, além da declividade da bacia, tipo de solo e uso do solo, métricas que descrevem a área da bacia e formações geológicas também são fatores importantes. Além disso, em trabalhos precedentes a classe de uso do solo de floresta é a citada como mais relevante para os resultados da regressão. No presente trabalho a regressão aponta a classe de Agricultura como a mais relevante.

Analisando as equações de regressão dos parâmetros relacionados ao armazenamento inicial dos tanques, verifica-se que a variação do parâmetro *S1* é explicada somente pela porção de uso do solo referente à classe de Reflorestamento e a variação parâmetro *S2* é explicada pela Declividade Média e pelas porções de área cuja declividade é das classes Plano ou Montanhoso. As métricas de Índice de Precipitação Antecedente, incluídas na análise de regressão especificamente para descrever a condição inicial de umidade da bacia, não se mostraram relevantes para explicar o armazenamento inicial dos tanques. Da mesma forma, observando as equações de regressão dos parâmetros relacionados à condição inicial de sedimentos, verifica-se que a variação do parâmetro *X* é explicada apenas pela Declividade Média da bacia e a variação do parâmetro *SMI* é explicada apenas pela porção de solo de Classe C. O resultado indica que os Índices de Precipitação para Sedimentos não foram suficientemente relevantes para explicar a concentração de sedimentos inicial e a massa de sedimentos inicial do primeiro tanque.

O significado físico da relação entre os parâmetros do Tank Model e as características da bacia na análise de regressão linear múltipla segue a mesma lógica aplicada para a análise de correlação, porém, no caso da análise de regressão são observados os sinais dos coeficientes da regressão.

Nota-se que os coeficientes da regressão exibiram o mesmo sinal observado para os coeficientes de correlação obtidos na análise preliminar de correlação, exceto para as características relativas ao Coeficiente de Compacidade da equação de regressão do parâmetro *HA2*, ao Comprimento do Rio Principal da equação de regressão de *HBI*, à porção de uso do solo de Reflorestamento da equação de regressão de *S1* e à Declividade Média da equação de regressão de *S2*. Para essas características o coeficiente da regressão indica sinal oposto ao verificado na análise de correlação. A alteração do sinal pode ser explicada pela ocorrência dos efeitos de mediação e confusão (MACKINNON; KRULL; LOCKWOOD, 2000).

5.9. Dificuldades e limitações da pesquisa

Durante o desenvolvimento da presente pesquisa foram encontradas algumas dificuldades e limitações quanto aos materiais e métodos utilizados, principalmente relacionadas à falta de dados e à incerteza.

O estudo de regionalização do Tank Model proposto consistiu em determinar equações empíricas para estimar os valores ótimos dos parâmetros do modelo. Estudos empíricos como a análise de regressão linear múltipla aplicada para estabelecer relações matemáticas entre as características da bacia e os parâmetros do Tank Model são baseados na experiência e na observação. Dessa forma, a disponibilidade de grande volume de dados é desejável.

Considera-se como principal limitação da pesquisa o número reduzido de bacias hidrográficas incluídas na área de estudo. A indisponibilidade de dados hidrossedimentológicos em escala sub-horária restringiu a quantidade de bacias aptas para compor a área de estudo da pesquisa, totalizando apenas quatro bacias. Trabalhos similares como os publicados por Kim, Kim e Yoon (2000), Kang, Lee e Park (2013), An et al. (2015) e Amiri et al. (2016) foram mais robustos quanto ao número de bacias consideradas. Para esses autores a área de estudo incluiu mais de 20 bacias.

Novamente ressalta-se que a escassez de dados hidrológicos com escalas espacial e temporal adequadas ainda é um problema para o desenvolvimento de estudos em hidrologia (RIVEROS-IREGUI; COVINO; GONZÁLEZ-PINZÓN, 2018). Os motivos são bem conhecidos, além de dificuldades relacionadas aos custos elevados de instalação e manutenção de equipamentos, o monitoramento e coleta de dados em campo é uma atividade inerentemente desafiadora pois submete os profissionais e os equipamentos à riscos (ANGELINI SOBRINHA et al., 2014).

Outra limitação da pesquisa está relacionada ao período de monitoramento das bacias incluídas na área de estudo. A bacia do Rio Cunha foi a que apresentou o maior período de monitoramento, cerca de 17 meses. Já para as bacias RB01, RB10 e RB11 o período de monitoramento foi um pouco menor, cerca de 10 meses. As séries possuem grande volume de registros devido à taxa sub-horária de aquisição de dados, porém, o período de monitoramento das bacias foi relativamente curto comparando-se com trabalhos precedentes de regionalização do Tank Model (AMIRI et al., 2016; AN et al., 2015; YOKOO et al., 2001).

A primeira dificuldade encontrada no desenvolvimento do trabalho foi a necessidade de corrigir falhas nas séries de dados de precipitação, vazão e CSS. A análise das séries de dados demonstrou a presença de falhas relacionadas a falta de dados em alguns pontos das séries. As discontinuidades foram eliminadas, mas para isso algumas porções das séries precisaram ser descartadas, reduzindo a quantidade de dados disponíveis para desenvolver a pesquisa.

O Tank Model modificado não foi configurado para simular eventos abruptos de descarga de sedimentos, como quando desencadeado por escorregamentos. Assim, para evitar problemas na etapa de calibração foi necessário corrigir a série de dados de CSS de forma a remover os picos abruptos de descarga de sedimentos.

Considera-se que o tamanho reduzido das séries de dados e a presença de falhas não representaram uma limitação impeditiva para o desenvolvimento dos métodos da pesquisa. Entretanto, a necessidade de analisar e tratar as séries de dados de precipitação, vazão e CSS é

considerada uma dificuldade encontrada, pois a atividade dispendeu um tempo considerável, inicialmente não previsto.

A extensão da série de dados e a presença de descontinuidades na série de dados foram fatores decisivos para adoção da abordagem por eventos em relação ao tempo da simulação aplicada no trabalho.

Após a divisão das séries de dados em eventos hidrossedimentológicos notou-se que o número de eventos era relativamente pequeno. Na verdade, já era esperado que o número de eventos fosse reduzido tendo em vista o curto período de monitoramento das bacias.

Além da limitação relativa à quantidade de dados disponíveis, há também as incertezas associadas aos materiais e métodos utilizados.

Para fazer previsões hidrológicas sobre a resposta de uma bacia hidrográfica é necessário dispor de três componentes: um modelo de previsão, as informações climáticas (para alimentar o modelo) e os parâmetros do modelo (OHNUMA JUNIOR et al., 2007). Cada uma dessas componentes é também uma fonte de incerteza para a previsão, e “incerteza significa que um resultado é desconhecido ou não pode ser estabelecido a priori” (CHAFFE, 2009, p. 46). Conforme Chow, Maidment e Mays (1988), as incertezas hidrológicas podem ser separadas em três categorias: incertezas naturais, que resultam da variabilidade aleatória dos fenômenos hidrológicos; incertezas do modelo, derivadas das aproximações e hipóteses assumidas para representar os fenômenos físicos; e incertezas nos parâmetros.

No desenvolvimento da pesquisa foram utilizados dados secundários, fornecidos por outros autores, para os quais não se teve controle sobre os procedimentos de monitoramento e coleta de dados. O próprio procedimento de medição, inerentemente, é uma fonte de incerteza, visto que não é possível ter total controle e nem absoluta certeza sobre a natureza daquilo que é medido. Somado a isso, os próprios autores relataram dificuldades e problemas durante a etapa de aquisição de dados, tais como a interrupção da alimentação de energia do equipamento de medição, incrustação no leitor do sensor de turbidez, vandalismo, entre outros (CARDOSO, 2013; GOERL, 2014). Essas dificuldades e problemas podem ter afetado a qualidade dos dados de precipitação, vazão e CSS. Além disso, as condições de campo costumam ser adversas e muitas vezes soluções criativas são necessárias para que o monitoramento e a coleta de dados sejam executados (ANGELINI SOBRINHA et al., 2014). É aconselhável parcimônia nesse caso, pois deixar de seguir as recomendações técnicas também pode comprometer a qualidade dos dados.

As curvas-chave para transformação de nível em vazão e transformação de turbidez em CSS também podem ter sido uma fonte de incerteza. Essas curvas foram derivadas de relações empíricas de nível-vazão e de turbidez-CSS determinadas a partir da coleta de dados em campo. A qualidade das curvas depende diretamente da quantidade e da magnitude de eventos medidos. Eventos de grande magnitude ocorrem de forma esporádica e, quando ocorrem, as variáveis são difíceis de medir devido às condições adversas de campo. Em função disso, muitas vezes não são incluídos eventos de cheia expressiva para construção das curvas-chave e são admitidas extrapolações. Tendo em vista que o período de monitoramento foi curto para as bacias da área de estudo, pode-se inferir que eventos de grande magnitude dificilmente foram considerados para a construção das curvas-chave das bacias.

Além do mais, quando o evento hidrossedimentológico é de grande magnitude outros processos além da erosão laminar começam a atuar, como por exemplo desbarrancamento de margens do canal, escorregamentos, transporte de sedimentos do leito, entre outros. Assim, espera-se que as incertezas sobre os valores de vazão e CSS estimados a partir das curvas-chave aumentem quanto maior for a magnitude do evento, mesmo tendo sido utilizados dados coletados em campo para grandes eventos para construção das curvas-chave.

Na presente pesquisa, a maioria dos eventos hidrossedimentológicos utilizados para calibração e validação do Tank Model para estimativa do escoamento e descarga de sedimentos apresentaram magnitude de precipitação expressiva. A precipitação acumulada dos eventos variou de 13 a 80 mm, sendo a média de 50 mm, aproximadamente.

Conforme Yapo, Gupta e Sorooshian (1996), a baixa qualidade dos dados coletados em campo pode prejudicar a calibração de modelos hidrológicos, tal como o Tank Model. Assim, não se descarta a possibilidade de erros na definição do conjunto de valores ótimos dos parâmetros do Tank Model, apesar dos resultados satisfatórios encontrados.

O procedimento de calibração dos parâmetros de um modelo, por si só, também está sujeito à incerteza. Na calibração do Tank Model é possível que mais de um conjunto de parâmetros produzam resultados semelhantes (CHAFFE, 2009) e, neste quesito, as condições iniciais do modelo são determinantes para a definição dos parâmetros (SUGAWARA, 1995). No presente trabalho, cada procedimento de calibração gerou 200 soluções para cada parâmetro do modelo.

A etapa de calibração dos parâmetros do Tank Model para escoamento foi a que mais dependeu tempo de trabalho durante o desenvolvimento da pesquisa. Certa dificuldade também foi encontrada nessa etapa. Verificou-se que o algoritmo NSGA-II não foi capaz de encontrar um conjunto de valores ótimos dos parâmetros que fornecesse um ajuste razoável da curva de escoamento para alguns eventos simulados. Para esses casos os eventos foram desconsiderados e a calibração prosseguiu utilizando outros eventos.

Atribui-se o insucesso do ajuste da curva de escoamento simulada para alguns eventos principalmente à qualidade dos dados de precipitação. Apenas uma estação pluviométrica foi utilizada para o monitoramento da precipitação na bacia do Rio Cunha. Para as bacias RB01, RB10 e RB11 o monitoramento foi realizado inicialmente com três estações pluviométricas, entretanto uma dessas ficou inoperante antes do término do monitoramento. Assim, levanta-se a hipótese de que a cobertura de pluviômetros foi baixa e a medição da precipitação pode não ter sido representativa o suficiente para alguns eventos, sendo subestimada ou superestimada em alguns momentos.

Conforme comenta Uhlenbrook (2006), a distribuição espacial dos medidores de precipitação nas bacias hidrográficas costuma não ser representativa. Em bacias montanhosas, os pluviômetros geralmente são instalados nos vales onde há ocupação humana e há disponibilidade de infraestrutura. Já nas regiões mais remotas da cabeceira da bacia, de difícil acesso, a presença de estações é insuficiente ou até mesmo inexistente. Acrescenta-se que justamente as regiões mais altas são aquelas que tendem a receber as maiores quantidades de precipitação devido ao efeito horográfico. A bacia do Rio Cunha pode ser tomada como exemplo. O pluviômetro foi instalado próximo ao exutório e a amplitude altimétrica da bacia é

bastante expressiva, assim pode-se associar inconsistências nos dados de precipitação à falha do monitoramento.

Ainda quanto à calibração, destaca-se que a única ferramenta utilizada para determinar os valores ótimos dos parâmetros do Tank Model foi o algoritmo NSGA-II. Os trabalhos correlatos mais recentes também utilizaram algoritmos genéticos para calibrar os parâmetros do modelo (AMIRI et al., 2016; AN et al., 2015). Entretanto, existem outras técnicas para calibração do Tank Model (CELESTE; CHAVES, 2014; CHEN; PI; HSIEH, 2005; SOUZA RODRIGUES PEREIRA et al., 2016). Autores como Kim e Kim (2004) e Lee e Kang (2007) testaram mais de um método para calibração dos parâmetros e verificaram diferenças nas respostas da calibração, sendo por eles definido como melhor conjunto de valores aquele que forneceu o menor erro na simulação. Nesse sentido, o presente trabalho foi limitado pela utilização de uma única técnica de calibração. Talvez outros métodos poderiam fornecer um melhor conjunto de soluções, porém, por questão de tempo disponível para desenvolvimento da pesquisa não foram considerados.

Destaca-se que no presente trabalho não foi considerado um método numérico específico para desenvolvimento do algoritmo do Tank Model modificado, sendo utilizada a abordagem clássica aplicada também para a maioria dos trabalhos que utilizaram o modelo em trabalhos prévios. A abordagem comum para integrar equações diferenciais ordinárias é baseado em aproximações de diferenças finitas (SCHOUPS et al., 2010). Uma abordagem alternativa que poderia ser empregada é baseada em métodos do tipo Splitting (MCLACHLAN; QUISPTEL, 2002), cuja ideia básica é dividir sequencialmente a equação diferencial ordinária em duas ou mais partes que são mais fáceis de integrar do que o problema original. As aproximações numéricas também representam uma fonte de incerteza para os resultados do presente trabalho.

Nas etapas de calibração e de validação verificou-se que para alguns eventos hidrossedimentológicos a curva do hidrograma simulado não foi suave na transição do escoamento de base para o escoamento superficial e/ou não foi suave na transição do escoamento superficial para o escoamento de base. A utilização de um método numérico poderia contribuir para um melhor ajuste entre o hidrograma simulado e o hidrograma observado.

Outra fonte de incerteza da pesquisa está relacionada aos dados de evapotranspiração. Devido à ausência de dados medidos dessa variável optou-se por utilizar os valores de evapotranspiração de referência fornecidos pela literatura. A evapotranspiração de referência é calculada para uma superfície vegetada cujas características são bastante específicas. Por outro lado, a superfície das bacias que compõem área de estudo é ocupada por diferentes classes de vegetação, como floresta, pastagens e culturas agrícolas, sendo diferente da superfície vegetada utilizada para calcular a evapotranspiração de referência. Por esse aspecto, entende-se que os valores de evapotranspiração aplicados no Tank Model durante as simulações não representam a realidade.

As equações de regionalização derivaram de relações empíricas e, em função disso, a aplicabilidade delas é limitada à condição para a qual foram desenvolvidas. Tendo em vista o reduzido número de bacias da área de estudo e a proximidade geográfica das bacias, a pesquisa apresentou uma limitação quanto à baixa variabilidade de características. Por esse aspecto, a

análise de regressão foi prejudicada e as equações de regionalização derivadas são aplicáveis para uma pequena gama de características, conforme as faixas apresentadas na Tabela 40.

Tabela 40 – Faixas de aplicação do modelo de regressão

Característica	Faixa de Aplicação	
	Mínimo	Máximo
Área da Bacia (km ²)	7	65
Perímetro da Bacia (km)	16	51
Altitude Média (m)	500	940
Coefficiente de Compacidade	1,53	1,78
Índice de Circularidade	0,31	0,42
Fator de Forma	0,13	0,28
Declividade Média da bacia (%)	16	33
Comprimento Drenagem (km)	20	154
Comprimento do Rio Principal (km)	5	22
Densidade de Drenagem (km.km ⁻²)	2,40	3,24
Classes de Declividade	Plano; Suave Ondulado; Ondulado; Forte Ondulado; Montanhoso; Escarpado.	
Unidades Geológico-Ambientais	DCGMGLgno; DCGR2salc; DSVMPasaf.	
Grupos Hidrológicos de Solo	Classe B; Classe C; Classe D.	
Classes de Uso do Solo	Agricultura; Edificação; Pastagem; Solo Exposto; Reflorestamento; Floresta Nativa.	

De forma geral, verificou-se baixa variabilidade de Classes de Declividade, de Unidades Geológico-Ambientais, de Classes de Grupo Hidrológico do Solo e de Classes de Uso do Solo nas bacias incluídas na área de estudo. Apesar disso, todas as Classes de Declividade e Classes de Uso do Solo foram consideradas no modelo de regressão. Estão presentes as Unidades Geológico-Ambientais DCGMGLgno, DCGR2salc e DSVMPasaf e as Classes de Grupo Hidrológico do Solo B, C e D, mas não a Classe A.

Outra limitação muito importante foi a impossibilidade de realizar a validação do modelo de regressão. Seria interessante aplicar as equações de regionalização obtidas para estimar os parâmetros do Tank Model de uma bacia diferente daquelas consideradas na análise de regressão e, em seguida, simular o escoamento e a descarga de sedimentos para alguns eventos hidrossedimentológicos. Confrontando os valores simulados e os valores observados seria possível avaliar a qualidade do modelo de regressão. Porém, devido ao número reduzido de bacias com dados disponíveis a possibilidade de validação do modelo de regressão foi descartada.

6. CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve por objetivo avaliar a aplicação do Tank Model para estimativa do escoamento e da produção de sedimentos em bacias hidrográficas e, como objetivo adicional, testar a regionalização do modelo. As conclusões do estudo são apresentadas a seguir.

O Tank Model original foi modificado para uma abordagem hidrossedimentológica. A estrutura do modelo foi baseada em dois módulos, um para simulação de escoamento e outro para simulação de descarga de sedimentos. Para o módulo de escoamento foram utilizados dois tanques em série e para o módulo de descarga de sedimentos apenas um tanque. O modelo foi composto por oito parâmetros fundamentais ($A0$, $B0$, $A1$, $A2$, $B1$, $HA1$, $HA2$ e $HB1$), dois parâmetros relacionados à condição inicial de armazenamento nos tanques ($S1$ e $S2$) e dois parâmetros relacionados à condição inicial de sedimentos (X e SM). A simulação foi baseada em eventos em relação ao período simulado. Para cada evento, o período simulado foi de algumas horas ou dias.

Testes preliminares envolvendo a utilização de dois tanques em série para o módulo de descarga de sedimentos também foram executados. Os resultados apontaram que a aplicação de um tanque foi suficiente para simulação da descarga de sedimentos de eventos hidrossedimentológicos com duração de algumas horas ou dias.

A entrada de sedimentos do modelo foi estabelecida matematicamente pela multiplicação da concentração de sedimentos da bacia (X) e a intensidade da precipitação (I), sendo a intensidade da precipitação elevada a uma potência inteira a . A partir das simulações de descarga de sedimentos definiu-se que a relação linear ($a = 1$) é adequada para representar a relação da concentração de sedimentos da bacia e a intensidade da precipitação.

Os parâmetros do Tank Model modificado foram determinados por calibração automática multiobjetivo utilizando o algoritmo genético NSGA-II. Primeiro foram determinados os valores ótimos dos parâmetros do módulo de escoamento e depois os parâmetros do módulo de descarga de sedimentos.

Os parâmetros fundamentais e os parâmetros relacionados ao armazenamento inicial dos tanques foram calibrados para três eventos hidrossedimentológicos para cada bacia incluída na área de estudo. Os valores de NS foram superiores a 0,80, indicando bom ajuste entre os escoamentos simulado e observado. Para cada parâmetro fundamental do Tank Model, o valor ótimo foi definido como a mediana dos valores ótimos de cada evento hidrossedimentológico simulado.

Na etapa de validação do Tank Model foram simulados mais dois eventos hidrossedimentológicos para cada bacia incluída na área de estudo. Os valores dos parâmetros fundamentais foram definidos como sendo os valores ótimos obtidos na etapa de calibração e os valores dos parâmetros relacionados ao armazenamento inicial nos tanques foram obtidos por calibração para cada evento simulado. Os escoamentos simulado e observado exibiram boa concordância entre si. Os valores de NS foram superiores a 0,60, os valores de RSR foram inferiores a 0,63 e, em termos absolutos, os valores de $PBIAS$ foram inferiores a 9,77%.

Posteriormente, os parâmetros relacionados às condições iniciais de sedimentos foram calibrados para dois eventos hidrossedimentológicos para cada bacia incluída na área de estudo. A simulação de descarga de sedimentos foi satisfatória para a maioria dos eventos analisados.

Os valores de *NS* variaram de 0,330 a 0,886. Os valores de *RSR* variaram de 0,337 a 0,819. Os valores de *PBIAS* variaram de -53,06% a 30,85%. A simulação de descarga de sedimentos do evento (7) da bacia RB01 gerou um resultado de *NS* abaixo do valor de referência de 0,36. O evento (6) e o evento (7) da bacia RB01 e o evento (7) da bacia RB11 apresentaram valor de *RSR* acima do valor recomendado de 0,70.

Dado o baixo desempenho da simulação da descarga de sedimentos do evento (7) da bacia RB01, o evento foi desconsiderado nas análises posteriores.

Os resultados encontrados apontam que o Tank Model pode ser adaptado para uma abordagem hidrossedimentológica e ser utilizado para simular a produção de sedimentos em bacias hidrográficas.

Com base na literatura foram selecionadas características que pudessem estar associadas com o escoamento e a produção de sedimentos em bacias hidrográficas. Para executar a regionalização dos parâmetros do Tank Model modificado foram calculadas 37 métricas relacionadas à fatores morfológicos, geológicos, do solo, da vegetação e climático-hidrológicos capazes de descrever as características da bacia.

Antes de proceder a regionalização foi realizada a análise de correlação entre as características da bacia e os parâmetros do Tank Model. As características que apresentaram correlação significativa foram selecionadas para desenvolver a regionalização dos parâmetros do modelo.

A regionalização dos parâmetros do Tank Model foi realizada pelo método de regressão linear múltipla. Por meio do método foram derivadas equações relacionando os parâmetros do Tank Model e os índices das características da bacia hidrográfica para simulação do escoamento e da descarga de sedimentos. Os indicadores de qualidade da regressão linear múltipla foram bastante satisfatórios. As equações de regionalização exibiram valores de R^2 superiores a 0,88 e os valores de probabilidade de significância foram inferiores a 5%.

As métricas mais relevantes para explicar os parâmetros do Tank Model foram a Declividade Média, as porções de declividade das classes Plano e Montanhoso, as porções de solo dos Grupos Hidrológicos de Classe C e Classe D e as porções de uso do solo referente às classes de Agricultura, Edificação, Floresta Nativa e Reflorestamento.

Os resultados indicaram que a regionalização do Tank Model para produção de sedimentos é viável. Porém, destaca-se que há limitações na pesquisa desenvolvida e elas devem ser observadas.

A principal limitação da pesquisa foi o número reduzido de bacias hidrográficas incluídas na área de estudo. Devido ao reduzido número de bacias e à proximidade geográfica delas foi constatada baixa variabilidade de características das bacias, fator que prejudicou a análise de regressão. O reduzido número de bacias também impossibilitou realizar a validação do modelo de regressão. O período de monitoramento hidrossedimentológico nas bacias foi curto que, por sua vez, limitou a quantidade de dados disponíveis para executar a pesquisa. Além disso, há incertezas quanto à qualidade dos dados de precipitação, vazão, CSS e evapotranspiração utilizados.

Apesar das limitações encontradas, os objetivos de pesquisa propostos foram alcançados. Para trabalhos futuros destacam-se as seguintes potencialidades:

- Tendo em vista que a principal limitação do trabalho foi relativa à falta de dados hidrossedimentológicos sugere-se o desenvolvimento de pesquisas envolvendo monitoramento contínuo de longo prazo e coleta de dados em campo para construção de bases de dados hidrossedimentológicos, incluindo dados de precipitação, vazão, CSS e evapotranspiração;
- Considerando que o Tank Model modificado para produção de sedimentos aplicado na presente pesquisa foi diferente de outras abordagens já testadas anteriormente sugere-se a aplicação do modelo proposto para outras bacias hidrográficas como forma de verificar sua aplicabilidade para outras áreas de estudo. Além disso, sabendo que a aplicação do Tank Model para estimativa da produção de sedimentos em bacias hidrográficas é viável e que este é um campo de estudo com amplo potencial de pesquisa, sugere-se também o desenvolvimento de metodologias inovadoras buscando alcançar melhorias na capacidade do Tank Model para simular a produção de sedimentos;
- Foram encontrados apenas 10 artigos científicos na literatura que aplicaram técnicas de regionalização para estimar os parâmetros do Tank Model por meio de características da bacia hidrográfica para simulação do escoamento. Com a perspectiva de expansão do monitoramento hidrológico e melhoria nas bases de dados recomenda-se que mais estudos sobre a regionalização do modelo sejam executados, incorporando maior número de bacias hidrográficas e maior número de variáveis descritoras, com variedade de escala e de características das bacias. Novos trabalhos testando a regionalização do Tank Model para produção de sedimentos são importantes para reforçar ou descartar as tendências verificadas neste trabalho;
- Até então os trabalhos que aplicaram metodologias para regionalização do Tank Model utilizaram métricas para descrever as características da bacia hidrográfica de forma isolada na regressão linear múltipla, para trabalhos futuros sugere-se utilizar métricas baseadas na composição de características passíveis de espacialização, tal como declividade do terreno, formação geológica, tipo de solo e uso do solo, para testar o efeito da associação de características no comportamento hidrossedimentológico da bacia.

7. REFERÊNCIAS

- AHMAD, S. W. Tank Model Application for Runoff and Infiltration Analysis on Sub-Watersheds in Lalindu River in South East Sulawesi Indonesia. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 846, n. 012019, p. 8, 2017.
- AKSOY, H.; KAVVAS, M. L. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. **CATENA**, v. 64, n. 2–3, p. 247–271, dez. 2005.
- AMIRI, B. J. et al. Regionalization of Tank Model Using Landscape Metrics of Catchments. **Water Resources Management**, v. 30, n. 14, p. 5065–5085, 7 nov. 2016.
- AN, J. H. et al. Regression Equations for Estimating the TANK Model Parameters. **Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers**, v. 57, n. 4, p. 121–133, jul. 2015.
- ANGELINI SOBRINHA, L. et al. **Challenges of the Hydrological Monitoring of Small Hydrographic Basins: Case Study of the Mineirinho Stream Basin, São Carlos (Sp, Brazil)**. PROCEEDING OF THE 6th INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLOOD MANAGEMENT - ICFM6. **Anais...São Paulo, SP: Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, 2014
- AQILI, S. W. et al. Application of Modified Tank Model to Simulate Groundwater Level Fluctuations in Kabul Basin, Afghanistan. **Journal of Water and Environment Technology**, v. 14, n. 2, p. 57–66, 2016.
- ARNOLD, J. G. et al. LARGE AREA HYDROLOGIC MODELING AND ASSESSMENT PART I: MODEL DEVELOPMENT. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73–89, fev. 1998.
- ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M.; BERNHARDT, G. A comprehensive surface-groundwater flow model. **Journal of Hydrology**, v. 142, n. 1–4, p. 47–69, fev. 1993.
- BEASLEY, D. B.; HUGGINS, L. F.; MONKE, E. J. ANSWERS: A Model for Watershed Planning. **Transactions of the ASAE**, v. 23, n. 4, p. 0938–0944, 1980.
- BECK, M. B. Water quality modeling: A review of the analysis of uncertainty. **Water Resources Research**, v. 23, n. 8, p. 1393–1442, ago. 1987.
- BELLINASSO, T.; PAIVA, J. Avaliação da Produção de Sedimentos em Eventos Chuvosos em uma Pequena Bacia Hidrográfica Semi-Urbana de Encosta. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 4, p. 169–181, 1 dez. 2007.
- BEVEN, K. Changing ideas in hydrology — The case of physically-based models. **Journal of Hydrology**, v. 105, n. 1–2, p. 157–172, jan. 1989.
- BHUNYA, P. K. et al. A simple conceptual model of sediment yield. **Water Resources Management**, v. 24, n. 8, p. 1697–1716, 2010.
- BRANCO, N. **Avaliação da Produção de Sedimentos de Eventos Chuvosos em Uma Pequena Bacia Hidrográfica Rural de Encosta**. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, 1998.
- BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. 6. ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2010.

CAPRA, F. **O Tao da Física**. 22. ed. São Paulo: Cultrix, 2000.

CARDOSO, A. T. **Estudo Hidrossedimentológico em Três Bacias Embutidas no Município de Rio Negrinho - SC**. Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

CARVALHO, L. G. DE et al. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA: UMA ABORDAGEM ATUAL DE DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 3, 6 jul. 2011.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Editora Interciência, 2008.

CELESTE, A.; CHAVES, V. S. AVALIAÇÃO DE ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO E FUNÇÕES OBJETIVO PARA CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA DO MODELO CHUVA-VAZÃO TANK MODEL. **Ciência e Natura**, v. 36, n. 3, 3 out. 2014.

CHAFFE, P. L. B. **Monitoramento e Modelagem do Processo Chuva-Vazão de uma Pequena Bacia Florestal com Ênfase em Interceptação**. Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

CHELLA, M. R. et al. **Rede de monitoramento do Alto Iguaçu: instrumento para definição de metas progressivas para enquadramento**. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...João Pessoa**, PB: 2005

CHEN, R.-S.; PI, L.-C.; HSIEH, C.-C. APPLICATION OF PARAMETER OPTIMIZATION METHOD FOR CALIBRATING TANK MODEL. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 41, n. 2, p. 389–402, abr. 2005.

CHIKITA, K. A. et al. Modelling discharge, water chemistry and sediment load from a subarctic river basin: The tanana river, alaska. **IAHS-AISH Publication**, n. 314, p. 45–56, 2007.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. [s.l.] McGraw-Hill, 1988.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Ajuste Multiobjetivo dos Parâmetros de um Modelo Hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 3, p. 27–39, 2003.

CPRM. **Mapa Geodiversidade do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis, SC: CPRM, 2010.

DE JONG, K. A. **Evolutionary Computation: A Unified Approach**. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2006.

DEB, K. et al. A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II. In: SCHOENAUER, M. et al. (Eds.). **Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI. PPSN 2000. Lecture Notes in Computer Science, vol 1917**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000. p. 849–858.

DEB, K. **Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms**. New York, NY: John Wiley & Sons, 2001.

DECHEN, S. C. F. et al. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, v. 74, n. 2, p. 224–233, 2015.

DEVALIYA, S.; TIWARI, H. L.; BALVANSI, A. Runoff Estimation of a Basin Using

Tank Model. **International Journal of Emerging Research in Management and Technology**, v. 6, n. 5, p. 51–53, 20 maio 2017.

DIAS, T. F. **Otimização multiobjetivo de uma máquina pentafásica utilizando NSGA-II**. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

DUAN, Q. **A global optimization strategy for efficient and effective calibration of hydrologic models**. [s.l.] (Thesis PhD) Univ. of Arizona, Tucson, 1991.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research**, v. 28, n. 4, p. 1015–1031, abr. 1992.

EIBEN, A. E.; SMITH, J. E. **Introduction to Evolutionary Computing**. Berlin: Springer, 2003.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa, 1979.

EWEN, J.; PARKIN, G.; O'CONNELL, P. E. SHETRAN: Distributed River Basin Flow and Transport Modeling System. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 5, n. 3, p. 250–258, jul. 2000.

FAVIS-MORTLOCK, D. **Soil Erosion by Water: Rainsplash**. Disponível em: <http://soilerosion.net/water_erosion.html>. Acesso em: 19 abr. 2018.

FERNÁNDEZ-RAGA, M. et al. Splash erosion: A review with unanswered questions. **Earth-Science Reviews**, v. 171, p. 463–477, ago. 2017.

FLACKE, W.; AUERSWALD, K.; NEUFANG, L. Combining a modified Universal Soil Loss Equation with a digital terrain model for computing high resolution maps of soil loss resulting from rain wash. **CATENA**, v. 17, n. 4–5, p. 383–397, ago. 1990.

FLORENZANO, T. G. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FOSTER, G. R. Modeling the erosion process. In: HAAN, C. T.; JOHNSON, H. P.; BRAKENSIEK, D. L. (Eds.). **Hydrologic modeling of small watersheds**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineering, 1982. p. 297–380.

FOSTER, G. R.; MEYER, L. D. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. In: **Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources ARS-S-40**. [s.l.] USDA-ARS, 1975. p. 190–207.

GABRIEL, P. H. R.; DELBEM, A. C. B. **Fundamentos de Algoritmos Evolutivos**. São Carlos, SP: Notas Didáticas do ICMC-USP, 2008.

GOERL, R. F. **Evolução da paisagem e conectividade hidrogeomorfológica na Bacia do Rio Cunha - SC**. Curitiba, PR: Universidade Federal do Paraná, 2014.

GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. New York, NY: Addison-Wesley, 1989.

GRACIA-SÁNCHEZ, J. GENERATION OF SYNTHETIC SEDIMENTGRAPHS. **Hydrological Processes**, v. 10, n. 9, p. 1181–1191, set. 1996.

GRISON, F. **Estudo da Geometria Hidráulica do Rio dos Bugres, no Município de Rio**

Negrinho - SC. Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

GUERRA, A. J. T. A erosão dos solos no contexto social. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 17, p. 14–23, 1994.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 4, n. 2, p. 135–143, abr. 1999.

GUY, H. P. Fluvial Sediment Concepts. In: **U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations. Book 3: Applications of Hydraulics**. Arlington, VA: United States Government Publishing Office, 1970. p. 55.

HAAN, C. T. Parametric Uncertainty in Hydrologic Modeling. **Transactions of the ASAE**, v. 32, n. 1, p. 0137–0146, 1989.

HE, Y.; BÁRDOSSY, A.; ZEHE, E. A review of regionalisation for continuous streamflow simulation. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, n. 11, p. 3539–3553, 23 nov. 2011.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence**. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975.

HORTON, R. E. Drainage-basin characteristics. **Transactions, American Geophysical Union**, v. 13, n. 1, p. 350, 1932.

HRACHOWITZ, M. et al. A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)—a review. **Hydrological Sciences Journal**, v. 58, n. 6, p. 1198–1255, ago. 2013.

HUH, Y. M.; PARK, S. W.; IM, S. A streamflow network model for daily water supply and demands on small watershed (I): Simulating daily streamflow from small watersheds. **Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers**, v. 35, n. 1, p. 40–49, 1993.

IBGE. **Mapa da Vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro, RJ, 2004. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Cartas_e_Mapas/Mapas_Murais/>. Acesso em: 10 mar. 2018

ISHIHARA, Y.; KOBATAKE, S. Runoff Model for Flood Forecasting. **Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute**, v. 29, n. 1, p. 27–43, 1979.

JAJARMIZAD, M.; HARUN, S.; SALARPOUR, M. A Review on Theoretical Consideration and Types of Models in Hydrology. **Journal of Environmental Science and Technology**, v. 5, n. 5, p. 249–261, 2012.

JAKEMAN, A. J. et al. Modelling upland and instream erosion, sediment and phosphorus transport in a large catchment. **Hydrological Processes**, v. 13, n. 5, p. 745–752, 15 abr. 1999.

KANG, M. G.; LEE, J. H.; PARK, K. W. Parameter Regionalization of a Tank Model for Simulating Runoffs from Ungauged Watersheds. **Journal of Korea Water Resources Association**, v. 46, n. 5, p. 519–530, 31 maio 2013.

KANG, S.-H. et al. A Study on Estimate of Sediment Yield Using Tank Model in Oship River Mouth of East Coast. **Korean Journal of Environmental Agriculture**, v. 30, n. 3, p. 268–274, 30 set. 2011.

KIDD, C. et al. So, How Much of the Earth's Surface Is Covered by Rain Gauges? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, n. 1, p. 69–78, jan. 2017.

- KIDO, D.; CHIKITA, K. A.; HIRAYAMA, K. Subglacial drainage system changes of the Gulkana Glacier, Alaska: discharge and sediment load observations and modelling. **Hydrological Processes**, v. 21, n. 3, p. 399–410, 30 jan. 2007.
- KIM, C.; KIM, S. K. Parameter optimization of Tank model using geographic data. **Journal of the Korean Society of Civil Engineers**, v. 24, n. 6, p. 553–560, 2004.
- KIM, H. Y.; PARK, S. W. An evaluation of parameter variations for a linear reservoir (Tank) model with watershed characteristics. **Journal of Korea Society of Agricultural Engineers**, v. 28, n. 2, p. 42–52, 1986.
- KIM, H. Y.; PARK, S. W. Simulating daily inflow and release rates for irrigation reservoirs. **Journal of Korea Society of Agricultural Engineers**, v. 30, n. 1, p. 50–62, 1988.
- KIM, S. J.; KIM, P. S.; JEE, Y. G. Parameter optimization of long and short term runoff models using genetic algorithm. **Journal of Korea Society of Agricultural Engineers**, v. 46, n. 5, p. 41–52, 2004.
- KIM, S. J.; KIM, P. S.; YOON, C. Y. A regression equation of Tank model parameters for daily runoff estimation in a region with insufficient hydrological data. **Journal of Korea Society of Agricultural Engineers Symposium**, p. 412–418, 2000.
- KIM, U.; KALUARACHCHI, J. J. Application of parameter estimation and regionalization methodologies to ungauged basins of the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. **Journal of Hydrology**, v. 362, n. 1–2, p. 39–56, 2008.
- KINNELL, P. I. A.; RISSE, L. M. USLE-M: Empirical Modeling Rainfall Erosion through Runoff and Sediment Concentration. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, n. 6, p. 1667, 1998.
- KUMAR, S.; RASTOGI, R. A. A conceptual catchment model for estimating suspended sediment flow. **Journal of Hydrology**, v. 95, n. 1–2, p. 155–163, nov. 1987.
- LAFLEN, J. M.; LANE, L. J.; FOSTER, G. R. WEPP: A new generation of erosion prediction technology. **Journal of Soil & Water Conservation**, v. 46, n. 1, p. 34–38, 1 jan. 1991.
- LANGBEIN, W. B.; SCHUMM, S. A. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. **Transactions, American Geophysical Union**, v. 39, n. 6, p. 1076, 1958.
- LANNA, A. E. **MODHAC: Modelo Hidrológico Auto-Calibrável**. Porto Alegre, RS: IPH/UFRGS, 1997.
- LEE, S. H.; KANG, S. U. A parameter regionalization study of a modified Tank model using characteristic factors of watersheds. **Journal of the Korean Society of Civil Engineers**, v. 27, n. 4B, p. 379–385, 2007.
- LEE, Y. H. Tank Model using Kalman Filter for Sediment Yield. **Journal of the Environmental Sciences**, v. 16, n. 12, p. 1319–1324, 31 dez. 2007.
- LEE, Y. H. Comparison of Sediment Yield by IUSG and Tank Model in River Basin. **Journal of the Environmental Sciences**, v. 18, n. 1, p. 1–7, 31 jan. 2009.
- LEE, Y. H.; SINGH, V. P. Tank model for sediment yield. **Water Resources Management**, v. 19, n. 4, p. 349–362, 2005.
- LI, Z.; FANG, H. Impacts of climate change on water erosion: A review. **Earth-Science**

Reviews, v. 163, p. 94–117, dez. 2016.

LOPES, J. E. G. SMAP – a simplified hydrologic model. In: SINGH, V. P. (Ed.). . **Applied Modeling in Catchment Hydrology**. Littleton, Colorado, USA: Water Resources Publication, 1982. p. 167–176.

LOPES, P. M. S. **Metodologias de calibração e validação do modelo de simulação climática CLIGEN de apoio à modelação de perda de solo**. [s.l.] Universidade de Évora, 2005.

MACKINNON, D. P.; KRULL, J. L.; LOCKWOOD, C. M. Equivalence of the mediation, confounding and suppression effect. **Prevention science : the official journal of the Society for Prevention Research**, v. 1, n. 4, p. 173–181, dez. 2000.

MAIDMENT, D. R. GIS and hydrologic modeling. In: GOODCHILD, M. F.; PARKS, B. O.; STEYAERT, L. T. (Eds.). . **Environmental modeling with GIS**. New York: Oxford University Press, 1993. p. 147–167.

MARINHO FILHO, G. M. et al. Modelos Hidrológicos: Conceitos e Aplicabilidade. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35–47, 2012.

MARTINI, L. C. P. et al. Avaliação da suscetibilidade a processos erosivos e movimentos de massa: Decisão multicriterial suportada em sistemas de informações geográficas. **Geologia USP - Serie Científica**, v. 6, n. 1, p. 41–52, 2006.

MCLACHLAN, R. I.; QUISPÉL, G. R. W. Splitting methods. **Acta Numerica**, v. 11, 15 jan. 2002.

MICHEL, G. P. **Modelagem de Estabilidade de Encostas Com Consideração do Efeito da Vegetação**. Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

MIYAMOTO, T. et al. Loading processes of major ions in a forested catchment: Observations and modelling. **Journal of Japanese Association of Hydrological Sciences**, v. 46, n. 1, p. 39–57, 2016.

MORÉ, J. J.; SORENSEN, D. C. Computing a Trust Region Step. **SIAM J. Sci. and Stat. Comput.**, v. 4, n. 3, p. 553–572, 1983.

MORGAN, R. P. C. **Soil Erosion and Conservation**. 3. ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2005.

MORIASI, D. N. et al. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations** Transactions of the ASABE, 2007.

MUKAKA, M. M. Statistics corner: A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. **Malawi Medical Journal**, v. 24, n. 3, p. 69–71, 2012.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282–290, abr. 1970.

NIE, W. et al. Modelling of River-Groundwater Interactions under Rainfall Events Based on a Modified Tank Model. **Geofluids**, v. 2017, p. 1–11, 2017a.

NIE, W. et al. A modified tank model including snowmelt and infiltration time lags for deep-seated landslides in alpine environments (Aggenalm, Germany). **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 17, n. 9, p. 1595–1610, 22 set. 2017b.

- OHNUMA JUNIOR, A. et al. Análise de Incertezas de Observações Hidrológicas e sua Influência na Modelagem de Pequenas Bacias Urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 1, p. 107–116, 2007.
- OKUNISHI, K.; WALLING, D. E.; SAITO, T. Discharge of Suspended Sediment and Solutes from a Hilly Drainage Basin in Devon, UK, as Analysed by a Cascade Tank Model. **Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute**, v. 40, n. 4, p. 143–160, 1990.
- OLIVA, R. Model calibration as a testing strategy for system dynamics models. **European Journal of Operational Research**, v. 151, n. 3, p. 552–568, dez. 2003.
- OSAWA, K.; SAKAI, K. Construction of the Suspended Sediment Runoff Model for Rainfall-Sediment Runoff Analysis. **Transactions of The Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering**, v. 2002, n. 217, p. 65–70, 2002.
- OU, X. et al. Investigation of the Tank Model for Urban Storm Water Management. **Journal of Water Management Modeling**, 2017.
- PANAGOS, P. et al. Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the European Union: From direct cost evaluation approaches to the use of macroeconomic models. **Land Degradation & Development**, p. 1–14, 2018.
- PANDEY, A. et al. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. **Catena**, v. 147, p. 595–620, 2016.
- PANDOLFO, C. et al. **Atlas climatológico do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis, SC: Epagri, 2002.
- PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. **Journal of Hydrology**, v. 279, n. 1–4, p. 275–289, ago. 2003.
- PIERI, L. et al. Using the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model to simulate field-observed runoff and erosion in the Apennines mountain range, Italy. **Journal of Hydrology**, v. 336, n. 1–2, p. 84–97, mar. 2007.
- PIMENTEL, D. et al. Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. **Science**, v. 267, n. 5201, p. 1117–1123, 24 fev. 1995.
- POESEN, J. An improved splash transport model. **Zeitschrift fur geomorphologie**, v. 29, n. 2, p. 193–211, 1985.
- POTTER, R. O. et al. **Solos do Estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2004.
- POWELL, M. J. D. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. **The Computer Journal**, v. 7, n. 2, p. 155–162, 1964.
- PULLEY, S. et al. GULLY EROSION AS A MECHANISM FOR WETLAND FORMATION: AN EXAMINATION OF TWO CONTRASTING LANDSCAPES. **Land Degradation & Development**, 17 abr. 2018.
- RAGHUNATH, H. M. Runoff. In: **Hydrology: principles, analysis and design**. 2. ed. New Delhi: New Age International, 2006. p. 476.
- RAGHUWANSHI, N. S.; RASTOGI, R. A.; KUMAR, S. Instantaneous-Unit Sediment Graph. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 120, n. 4, p. 495–503, abr. 1994.

- REFSGAARD, J. C. Terminology, Modelling Protocol And Classification of Hydrological Model Codes. In: ABBOTT, M. B.; REFSGAARD, J. C. (Eds.). . **Distributed Hydrological Modelling**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. p. 17–39.
- RENARD, K. G. et al. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). In: **Agriculture Handbook 703**. Washington: USDA, 1997.
- RENDON-HERRERO, O. unit sediment graph. **Water Resources Research**, v. 14, n. 5, p. 889–901, out. 1978.
- RIVEROS-IREGUI, D. A.; COVINO, T. P.; GONZÁLEZ-PINZÓN, R. The importance of and need for rapid hydrologic assessments in Latin America. **Hydrological Processes**, v. 32, n. 15, p. 2441–2451, jul. 2018.
- ROSENBROCK, H. H. An Automatic Method for Finding the Greatest or Least Value of a Function. **The Computer Journal**, v. 3, n. 3, p. 175–184, 1 mar. 1960.
- SAGARA, F. T. **Estudo hidrológico de uma pequena bacia hidrográfica experimental no município de General Carneiro-PR, através de monitoramento e modelagem**. Curitiba, PR: Universidade Federal do Paraná, 2001.
- SANTA CATARINA. **Atlas de Santa Catarina**. Rio de Janeiro, RJ: Aerofoto Cruzeiro, 1986.
- SANTOS, H. G. DOS et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013.
- SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos. Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 05-18, 2005.
- SAYÃO, L. F. Modelos teóricos em ciência da informação - abstração e método científico. **Ciência da Informação**, v. 30, n. 1, p. 82–91, abr. 2001.
- SCHNEIDER, C. From Pores to Pipes: The Problem of Underground Erosion in Soils. **Soil Horizons**, v. 55, n. 6, 2014.
- SCHOUPS, G. et al. Corruption of accuracy and efficiency of Markov chain Monte Carlo simulation by inaccurate numerical implementation of conceptual hydrologic models. **Water Resources Research**, v. 46, n. 10, p. 2009WR008648, 20 out. 2010.
- SECRETARIA DO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Diagnóstico Preliminar: Descritivo dos eventos ocorridos no dia 5 de janeiro de 2017 entre as regiões dos municípios de São Francisco de Paula e Rolante/RS**. Porto Alegre, RS: SEMA, 2017.
- SESHADRI, A. **NSGA - II: A multi-objective optimization algorithm**. [s.l.] MathWorks, 2009. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10429-nsga-ii--a-multi-objective-optimization-algorithm>>.
- SETIAWAN, B. I.; FUKUDA, T.; NAKANO, Y. **Developing procedures for optimization of tank model's parameters**. [s.l.] Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development. Manuscript LW 01 006., 2003. Disponível em: <<http://www.cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/393/387>>. Acesso em: 9 fev. 2019.

- SHEN, H. W. Sediment Transport Models. In: **Stochastic Approaches to Water Resources, Vol. 1**. Fort Collins, Colorado: Colorado State University, 1976.
- SINGH, P. K. et al. A sediment graph model based on SCS-CN method. **Journal of Hydrology**, v. 349, n. 1–2, p. 244–255, jan. 2008.
- SINGH, V. P. Hydrologic modeling: progress and future directions. **Geoscience Letters**, v. 5, n. 1, p. 15, 28 dez. 2018.
- SINGH, V. P.; BANUKIWICZ, A.; CHEN, V. J. An instantaneous unit sediment graph study for small upland watersheds. In: SINGH, V. P. (Ed.). **Modeling Components of Hydrologic Cycle**. Littleton, CO: Water Resour Publications, 1982. p. 534–554.
- SITTNER, W. T. WMO project on intercomparison of conceptual models used in hydrological forecasting. **Hydrological Sciences Journal**, v. 21, n. 1, p. 203–213, 1976.
- SIVAPALAN, M. et al. IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. **Hydrological Sciences Journal**, v. 48, n. 6, p. 857–880, dez. 2003.
- SMITH, F. **NT8743: River Tweed Erosion**. Disponível em: <<https://www.geograph.org.uk/photo/3360786>>. Acesso em: 3 dez. 2018.
- SMITH, M. B. et al. Hydrologic Model calibration in the National Weather Service. In: DUAN, Q. et al. (Eds.). **Calibration of Watershed Models**. Water Scie ed. [s.l.] American Geophysical Union, 2003. p. 133–152.
- SOARES JÚNIOR, A. et al. **Implementação de um algoritmo genético baseado em XML para a calibração do Tank Model**. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Anais...Campo Grande, MS: 2009
- SOARES, P. C.; SOARES, A. P.; FIORI, A. P. RACIOCÍNIO PROBABILÍSTICO APLICADO À SUSCETIBILIDADE DE ESCORREGAMENTOS: UM ESTUDO DE CASO EM CAMPO LARGO, PARANÁ, BRASIL. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 51, 31 dez. 2002.
- SOROOSHIAN, S. Parameter Estimation, Model Identification, and Model Validation: Conceptual-Type Models. In: BOWLES, D. S.; O'CONNELL, P. E. (Eds.). **Recent Advances in the Modeling of Hydrologic Systems**. Dordrecht, Netherlands: Springer, 1991. p. 443–467.
- SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: The question of parameter observability and uniqueness. **Water Resources Research**, v. 19, n. 1, p. 260–268, fev. 1983.
- SOUZA RODRIGUES PEREIRA, T. et al. DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO CHUVA-VAZÃO VIA TANK MODEL E CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 11, n. 3, 16 maio 2016.
- SRINIVAS, N.; DEB, K. Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. **Evolutionary Computation**, v. 2, n. 3, p. 221–248, set. 1994.
- STANESCU, V. A.; MUSY, A. **CATCHMENT HYDROLOGY - PART 1: FLOOD WAVE MODELS**. Disponível em: <http://echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod_1b/chapt_8/main.htm>. Acesso em: 18 jan. 2018.

- STRAHLER, A. N. HYPSONOMETRIC (AREA-ALTITUDE) ANALYSIS OF EROSIONAL TOPOGRAPHY. **GSA Bulletin**, v. 63, n. 11, p. 1117–1142, 1 nov. 1952.
- STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions, American Geophysical Union**, v. 38, n. 6, p. 913, 1957.
- SUGAWARA, M. On the Analysis of Runoff Structure about Several Japanese Rivers. **Japanese Journal of Geophysics**, v. 2, n. 4, p. 1–76, 1961.
- SUGAWARA, M. **The Flood Forecasting by a Series Storage Type Model**. Int. Symposium Floods and their Computation. **Anais...International Association of Hydrologic Sciences**, 1967
- SUGAWARA, M. Automatic calibration of the tank model. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, n. 3, p. 375–388, 1979.
- SUGAWARA, M. **Tank model with snow component**. [s.l.] Research note of the National Research Center for Disaster Prevention, No 65: 1-293., 1984.
- SUGAWARA, M. Tank model. In: SINGH, V. P. (Ed.). . **Computer Models of Watershed Hydrology**. Littleton, Colorado: Water Resources Publications, 1995. p. 165–214.
- SUGAWARA, M.; MARUYAMA, H. **On a method of deriving the monthly discharge of the river Naka from monthly precipitation (in Japan)** Research memoir of the Ins. of Statistical math. vol. 7. No.4., 1951.
- SUGAWARA, M.; MARUYAMA, H. **A method of prevision of the river discharge by means of a rainfall model**. Publ. No. 42 of the Symposia Darcy. **Anais...Dijon: Int. Assoc. Sci. Hydrol. (Gentbrugge)**, 1956
- SURYOPUTRO, N. et al. **Calibration of infiltration parameters on hydrological tank model using runoff coefficient of rational method**. 2017Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5003539>>
- TAKAHASHI, T. **Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures**. 2. ed. [s.l.] CRCPress / Balkema, 2014.
- TELLES, T. S.; GUIMARÃES, M. DE F.; DECHEN, S. C. F. The costs of soil erosion. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 287–298, 2011.
- TONELLO, K. C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhões, MG**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2005.
- TOY, T. J. Accelerated erosion: Process, problems, and prognosis. **Geology**, v. 10, n. 10, p. 524, 1982.
- UHLENBROOK, S. Catchment hydrology—a science in which all processes are preferential. **Hydrological Processes**, v. 20, n. 16, p. 3581–3585, 30 out. 2006.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **NRCS Photo Gallery**. Disponível em: <<https://photogallery.sc.egov.usda.gov/res/sites/photogallery/>>. Acesso em: 19 abr. 2018.
- VAN LIEW, M. W. et al. Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: Comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 12, n. 2, p. 173–189, mar. 2007.
- VASCONCELLOS, S. M. **Desenvolvimento de Um Índice de Umidade do Solo Derivado**

da Versão Distribuída do Tank Model. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada.** São Paulo, SP: Editora Mc Graw Hill, 1975.

WADA, T. et al. Glacial effects on discharge, sediment load and water chemistry from a subarctic river basin. **Journal of Japanese Association of Hydrological Sciences**, v. 37, n. 3, p. 103–113, nov. 2007.

WADA, T. et al. Glacial Effects on Discharge and Sediment Load in the Subarctic Tanana River Basin, Alaska. **Arctic, Antarctic, and Alpine Research**, v. 43, n. 4, p. 632–648, 2011.

WALLING, D. E. The sediment delivery problem. **Journal of Hydrology**, v. 65, n. 1–3, p. 209–237, ago. 1983.

WHEATER, H. S.; JAKEMAN, A. J.; BEVEN, K. J. Progress and Directions in Rainfall-Runoff Modelling. In: AKEMAN, A. K.; BECK, M. B.; MCALEER, M. J. (Eds.). . **Modelling Change in Environmental Systems.** Chichester: John Wiley and Sons, 1993. p. 101–132.

WILLIAMS, J. R. Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. In: **Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources.** [s.l.] U.S. Dep. Agr. ARS-S40, 1975. p. 244–252.

WILLIAMS, J. R. A sediment graph model based on an instantaneous unit sediment graph. **Water Resources Research**, v. 14, n. 4, p. 659–664, ago. 1978.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting Rainfall-Erosion Losses from Gopland East of the Rocky Mountains. In: **Agricultural Handbook 282.** Brooksville, FL: US Department of Agriculture - Agricultural Research Service, 1965. p. 47.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. In: **Agriculture Handbook 537.** Brooksville, FL: Science and Education Administration, US Department of Agriculture - Agricultural Research Service, 1978. p. 62.

YANTO, R.; SETIAWAN, B. I. . **Optimization of tank model using genetic algorithm.** Disponível em: <<http://web.ipb.ac.id/~budindra/>>. Acesso em: 9 fev. 2019.

YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. **Journal of Hydrology**, v. 181, n. 1–4, p. 23–48, jun. 1996.

YOKOO, Y. et al. Regionalization of lumped water balance model parameters based on multiple regression. **Journal of Hydrology**, v. 246, n. 1–4, p. 209–222, 2001.

YOKOO, Y.; KAZAMA, S. Numerical investigations on the relationships between watershed characteristics and water balance model parameters: Searching for universal relationships among regional relationships. **Hydrological Processes**, v. 26, n. 6, p. 843–854, 2012.

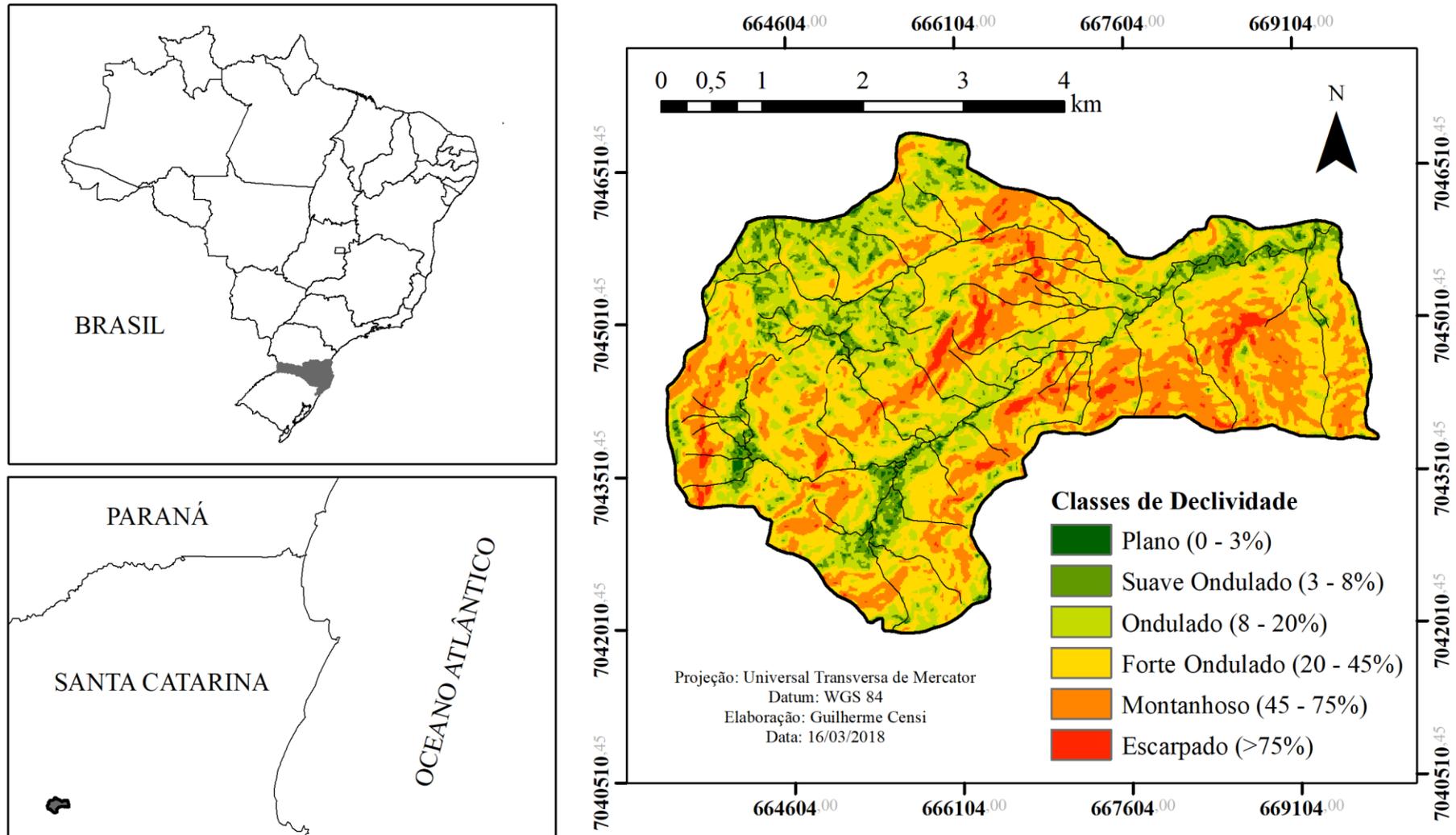
YOUNG, R. A. et al. AGNPS: A Non-Point-Source Pollution Model for Evaluating Agricultural Watersheds. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 44, n. 2, p. 168–173, 1 mar. 1989.

ZANANDREA, F.; KOBIYAMA, M.; MICHEL, G. P. **Conectividade**

Hidrossedimentológica: Uma Abordagem Conceitual. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...** Florianópolis, SC: 2017

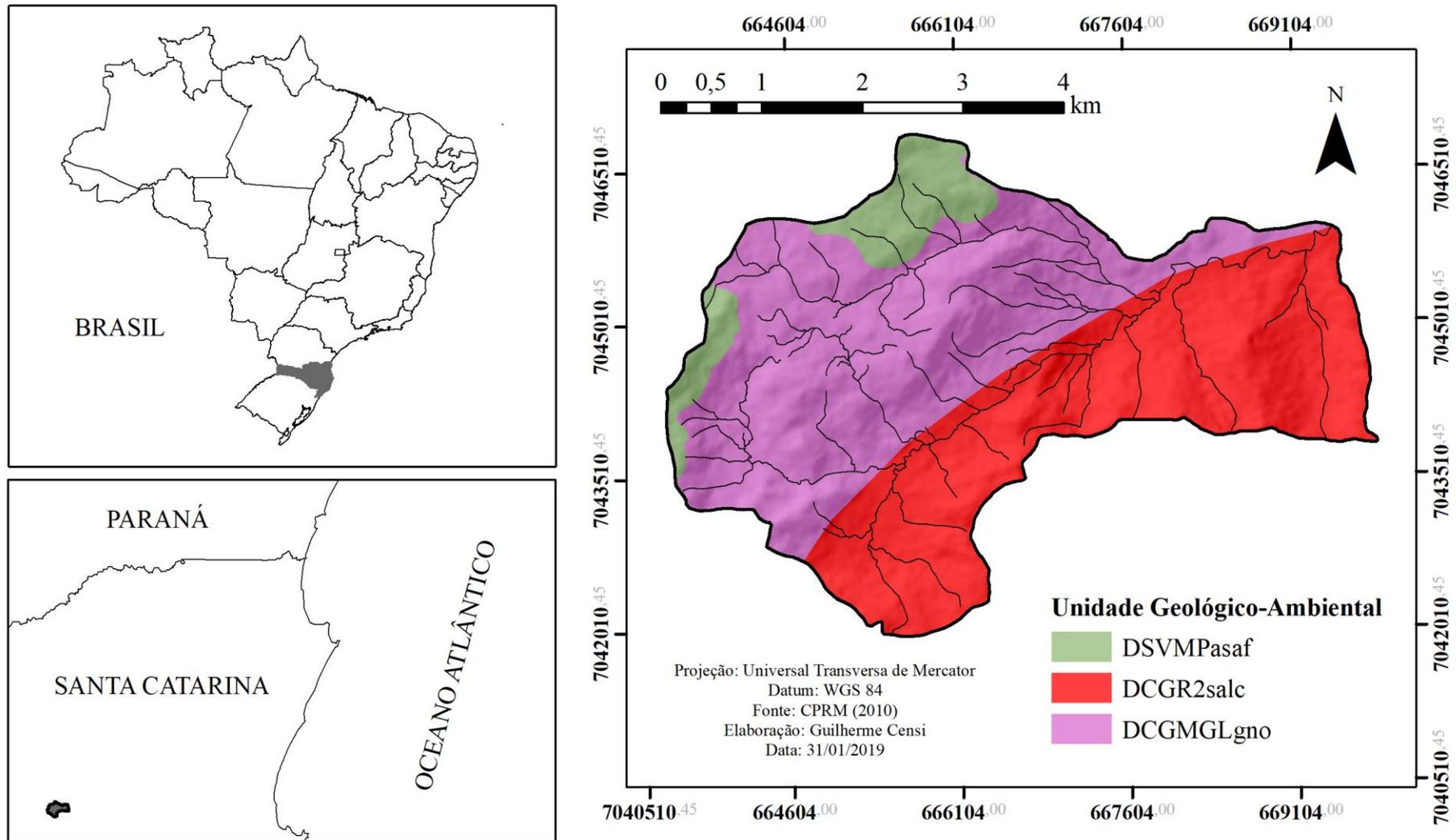
APÊNDICE A

Figura 76 – Mapa de Declividades da Bacia Hidrográfica do Rio Cunha



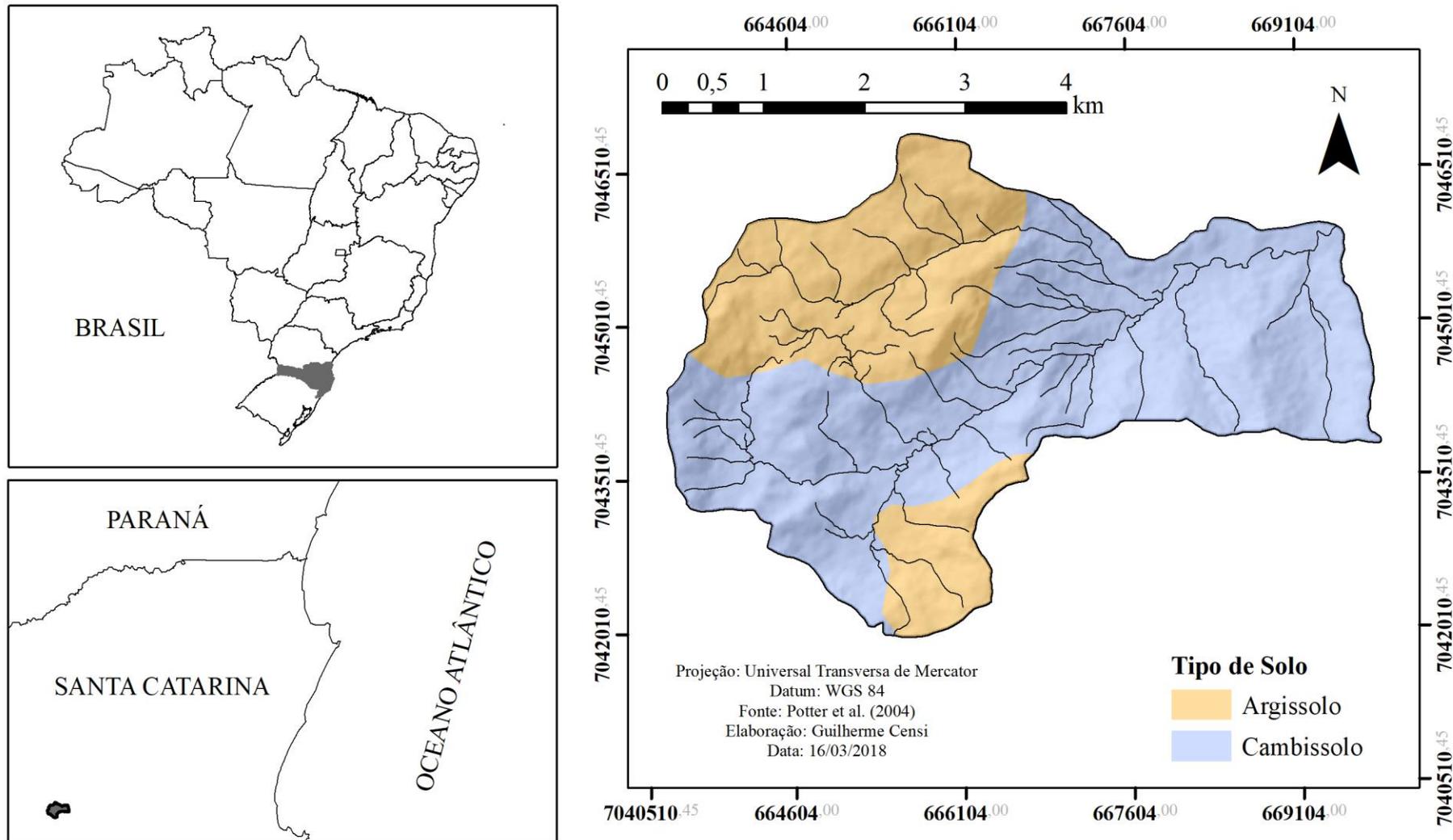
APÊNDICE B

Figura 77 – Mapa de Unidades Geológico-Ambientais da Bacia Hidrográfica do Rio Cunha



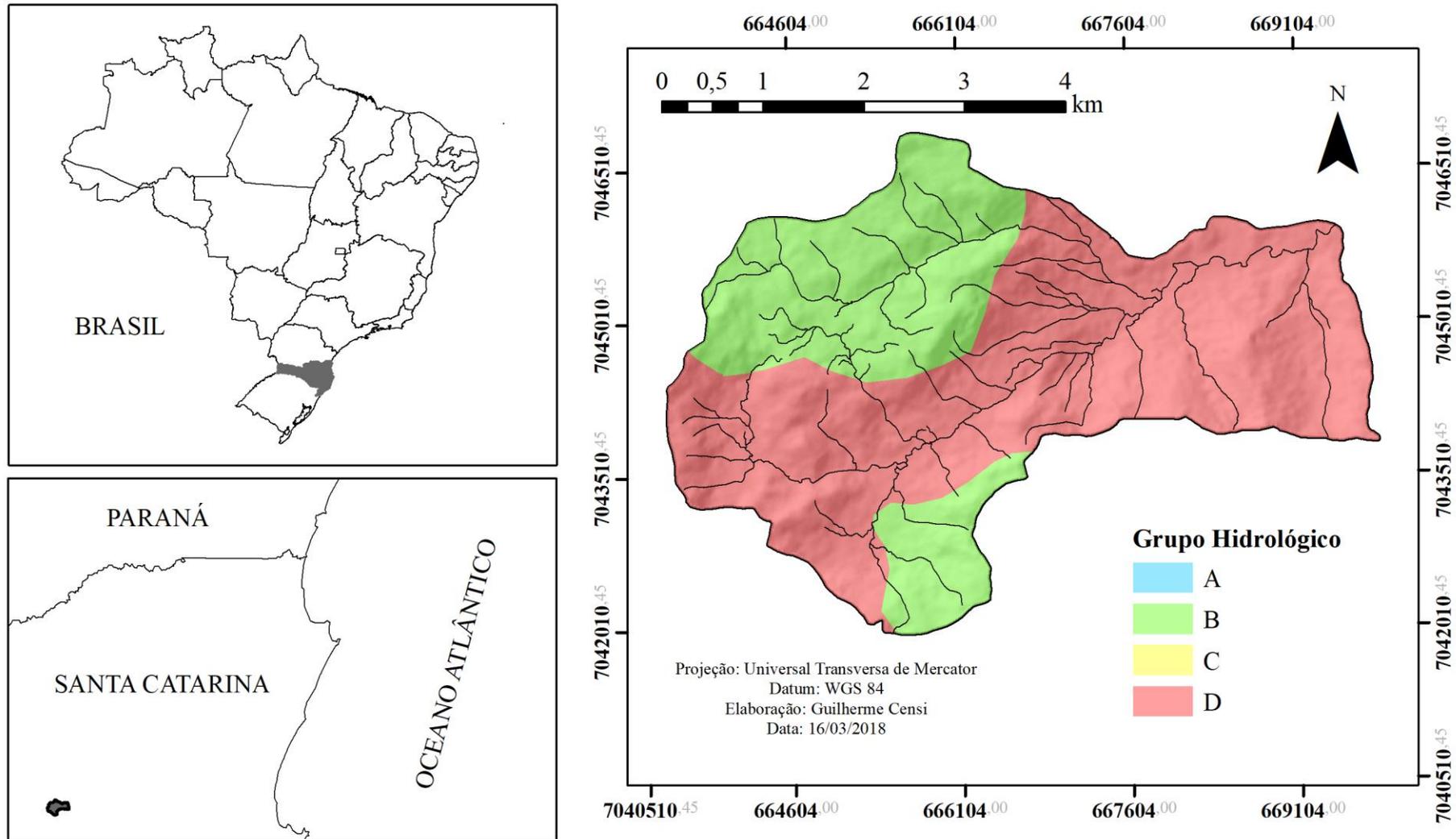
APÊNDICE C

Figura 78 – Mapa de Solos da Bacia Hidrográfica do Rio Cunha



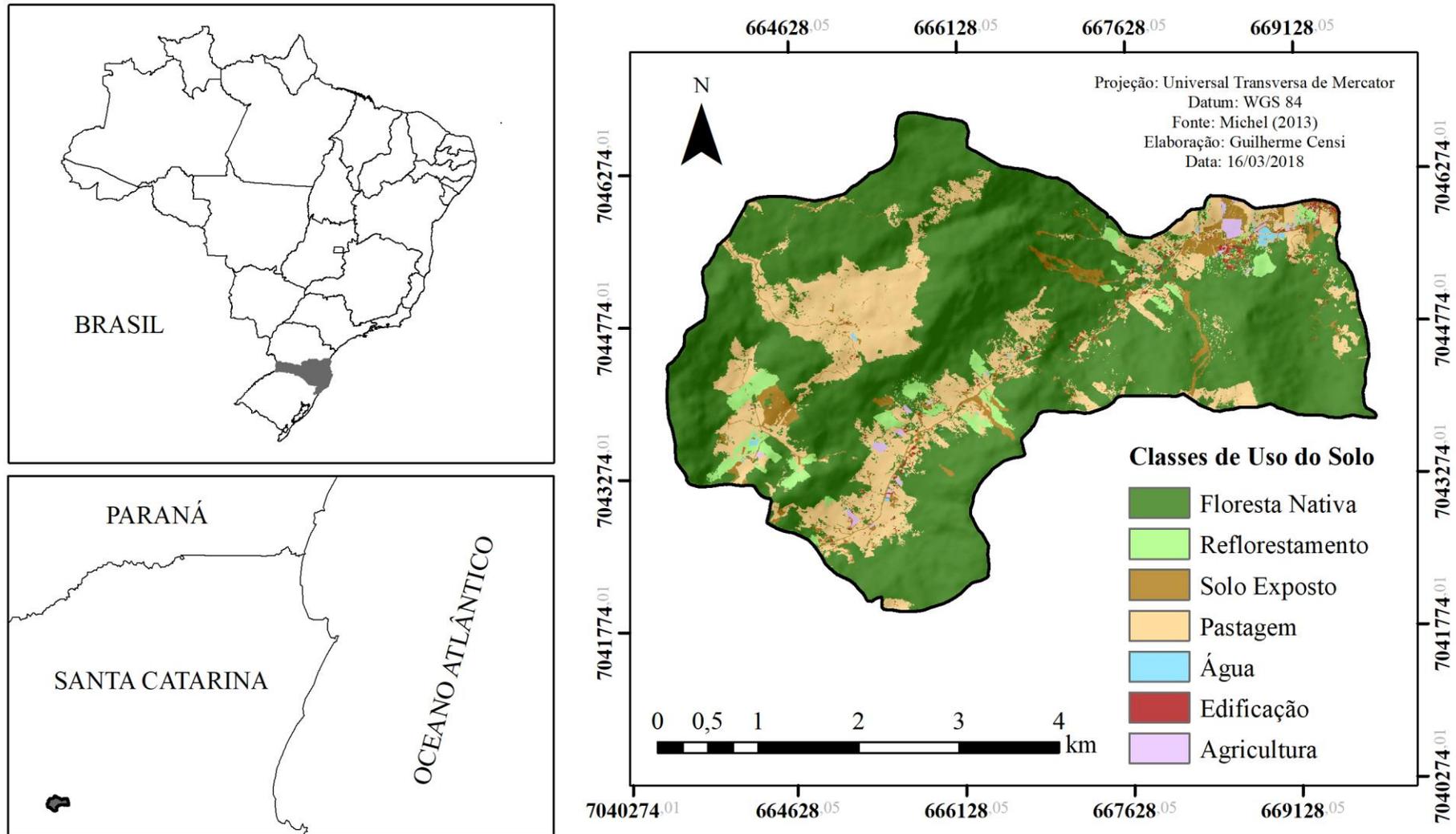
APÊNDICE D

Figura 79 – Mapa de Grupos Hidrológicos de Solo da Bacia Hidrográfica do Rio Cunha



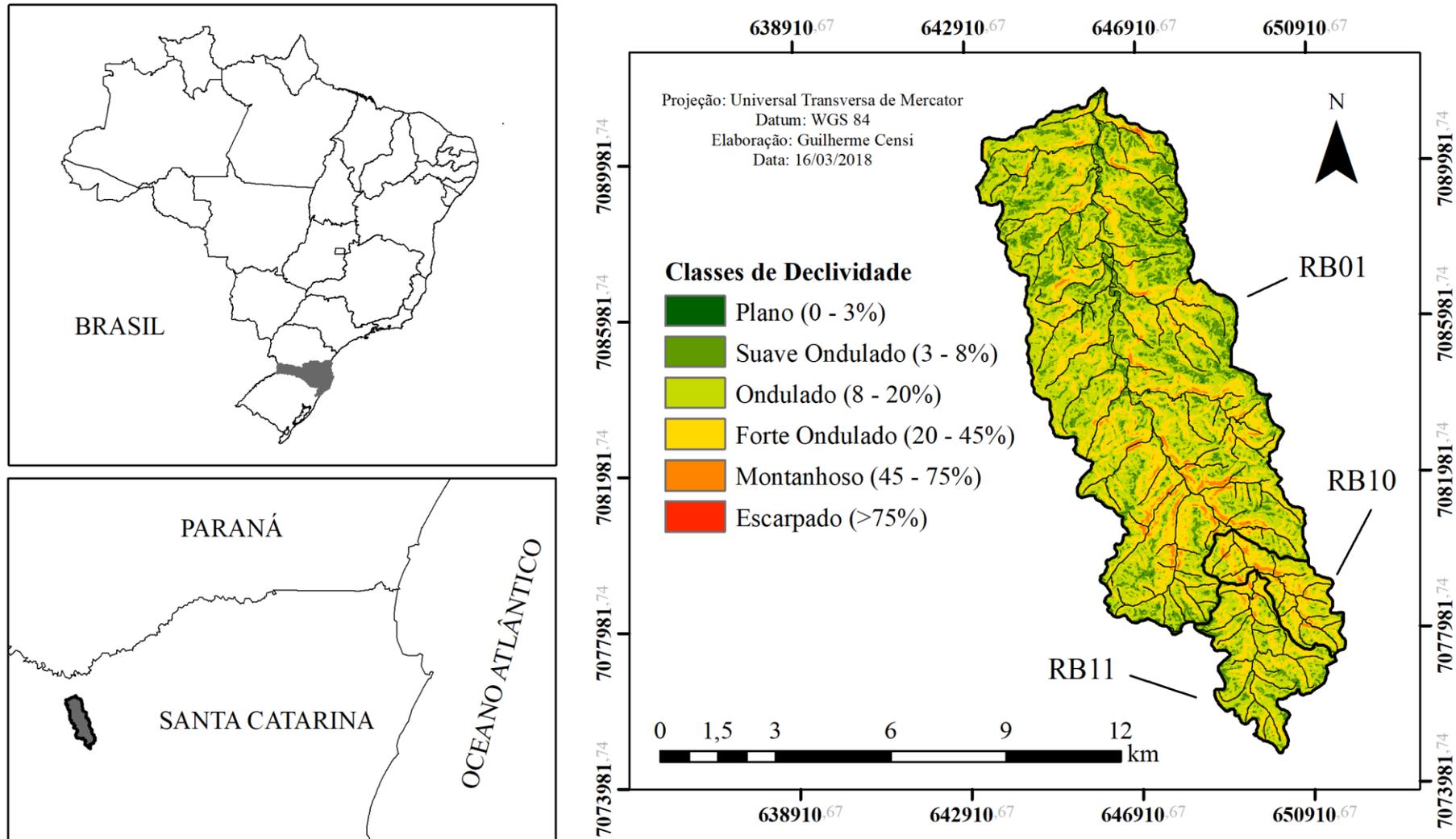
APÊNDICE E

Figura 80 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo da Bacia Hidrográfica do Rio Cunha



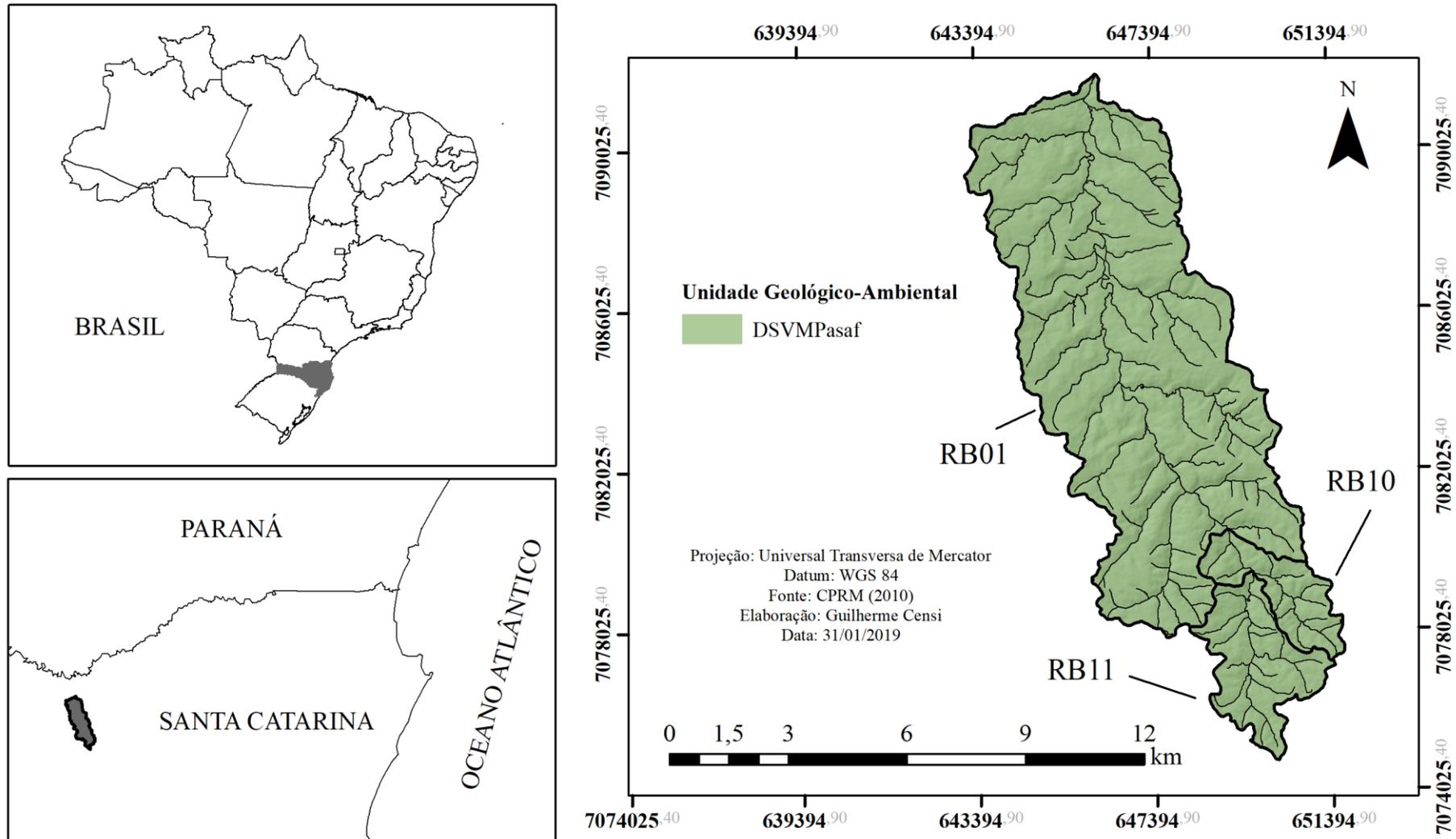
APÊNDICE F

Figura 81 – Mapa de Declividades das Bacias Hidrográficas RB01, RB10 e RB11



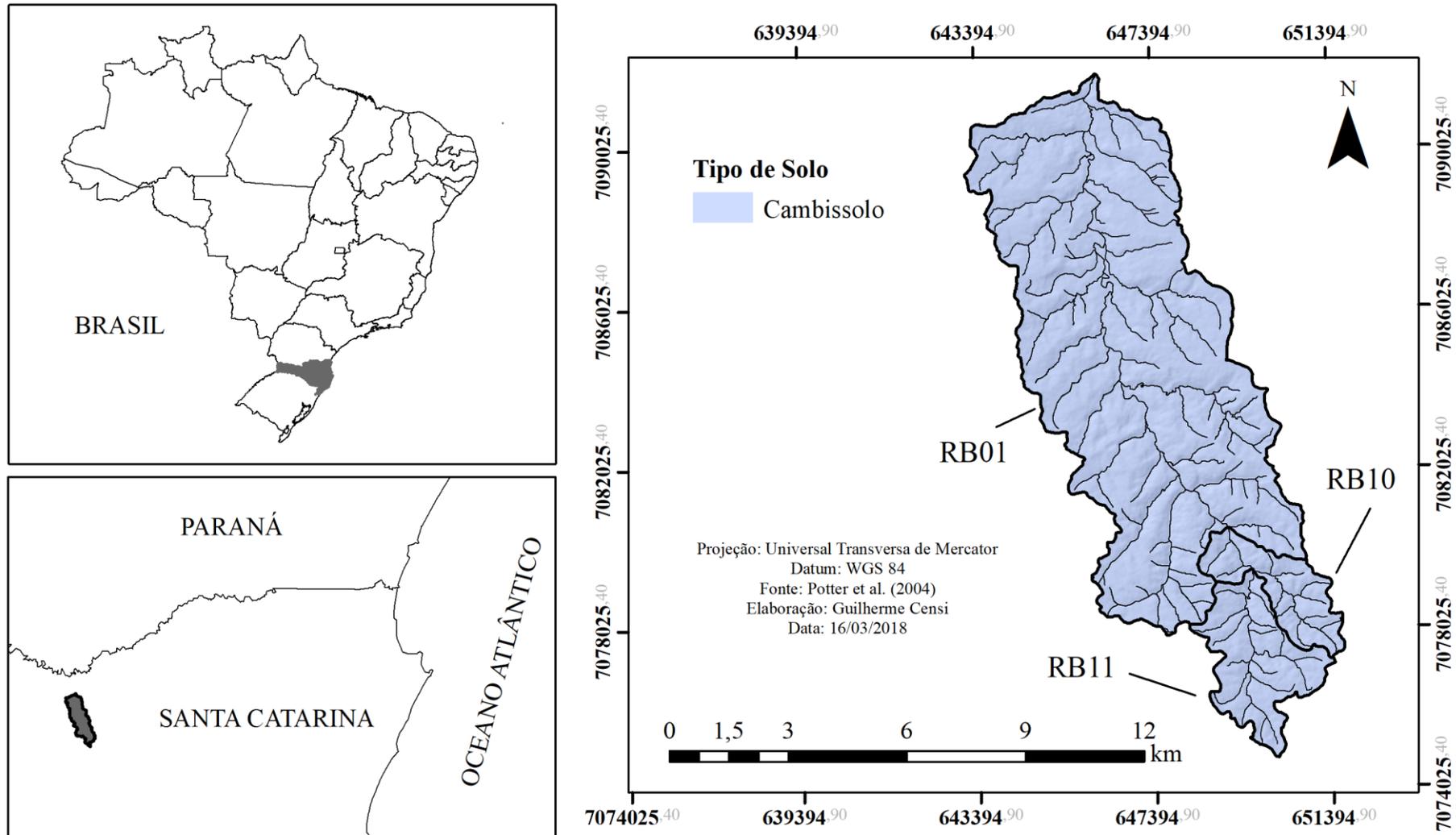
APÊNDICE G

Figura 82 – Mapa de Unidades Geológico-Ambientais das Bacias Hidrográficas RB01, RB10 e RB11



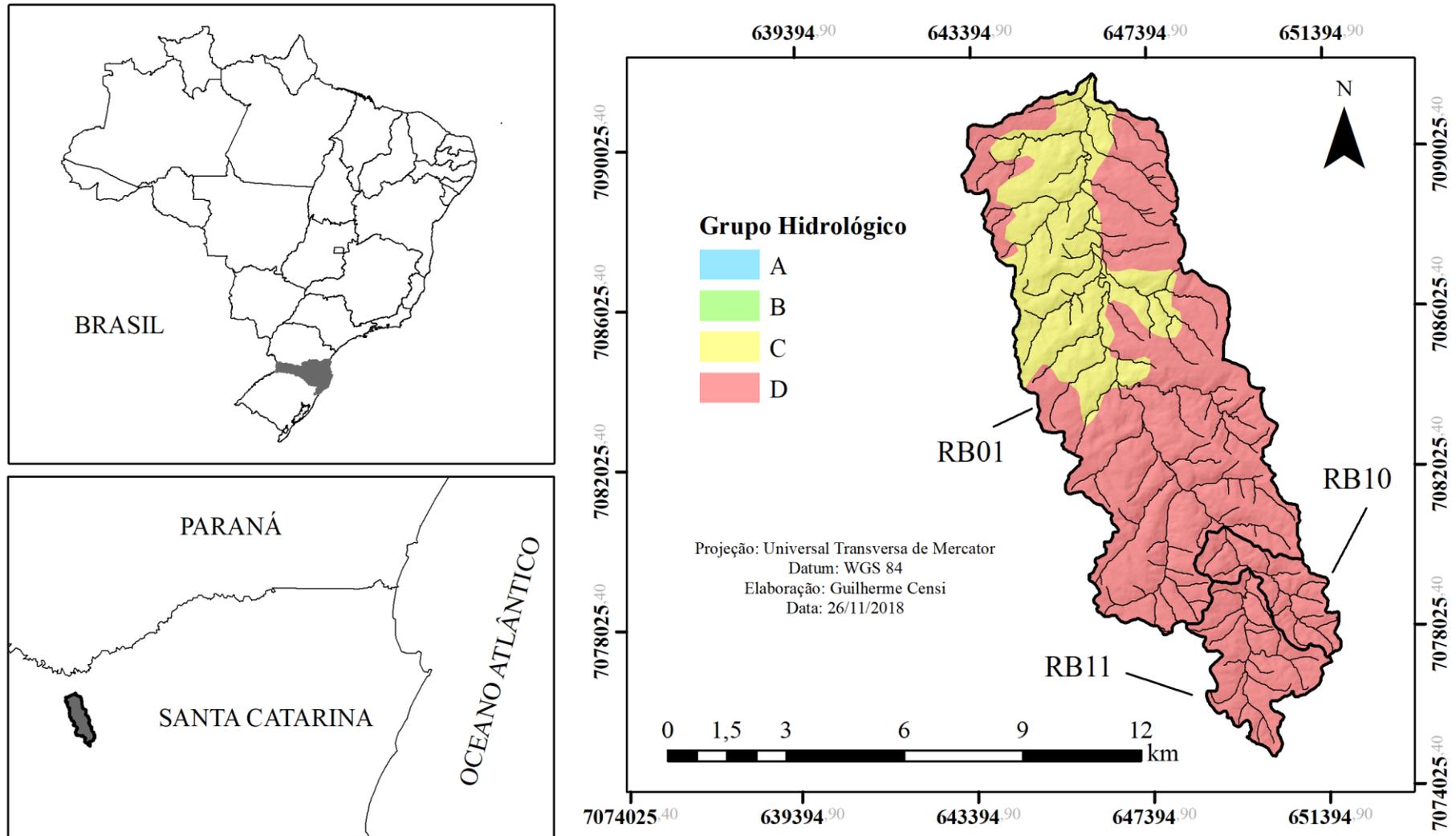
APÊNDICE H

Figura 83 – Mapa de Solos das Bacias Hidrográficas RB01, RB10 e RB11



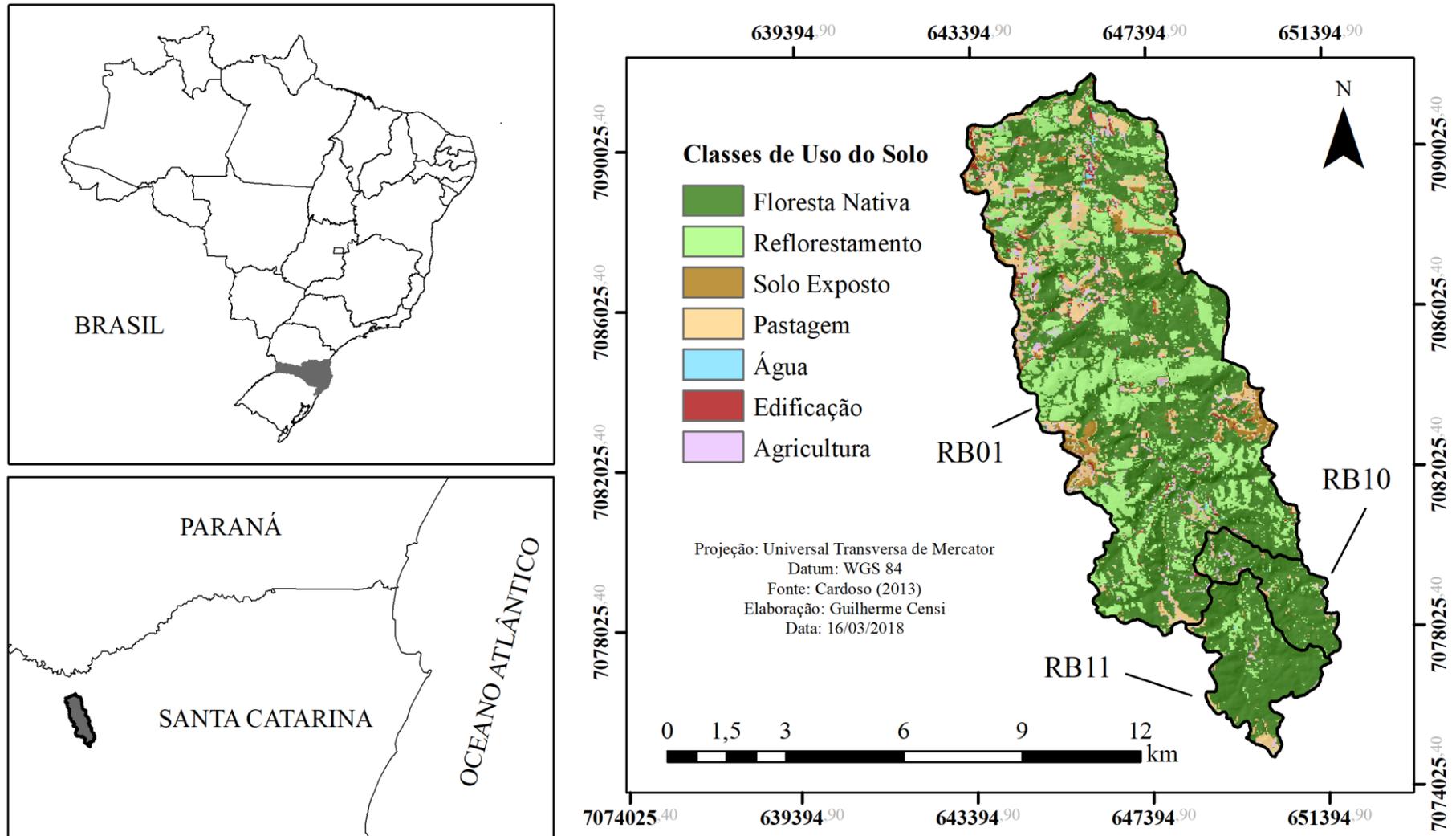
APÊNDICE I

Figura 84 – Mapa de Grupos Hidrológicos de Solo das Bacias Hidrográficas RB01, RB10 e RB11



APÊNDICE J

Figura 85 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo das Bacias Hidrográficas RB01, RB10 e RB11



APÊNDICE K

Algoritmo para separar eventos hidrossedimentológicos a partir de séries de dados

```
%%SEPARAR EVENTOS
%algoritmo para separar eventos hidrossedimentologicos a partir de series
%continuas

clc
clear
close all

%% ENTRADAS DO ALGORITMO
% A seguir o usuario deve definir os arquivos de entrada e os parametros
do
% algoritmo.

%[DEFINIDO PELO USUARIO]
% nome do arquivo.
nome = 'RB11_B2';

%[DEFINIDO PELO USUARIO]
% pasta de trabalho.
pasta = 'C:\Users\Guilherme_iph\Google Drive\TANK MODEL\EVENTOS\1.
eventos hidrossed\';

%[DEFINIDO PELO USUARIO]
%ler dados.
[~,txt,~] = xlsread(['serie_de_dados\' nome '.xlsx'],'data'); %data
data = txt;
chuva = xlsread(['serie_de_dados\' nome '.xlsx'],'chuva'); %precipitacao
vazao = xlsread(['serie_de_dados\' nome '.xlsx'],'vazao'); %escoamento
sedimento = xlsread(['serie_de_dados\' nome '.xlsx'],...
    'sedimento'); %sedimentos
evapo = xlsread(['serie_de_dados\' nome '.xlsx'],...
    'evapotranspiracao'); %evapotranspiracao

%[DEFINIDO PELO USUARIO]
% frequencia de aquisicao dos dados (Hz).
freq = 1/(60*10);

%[DEFINIDO PELO USUARIO]
% intervalo entre eventos(h).
% intervalo de tempo minimo contado a partir do cessamento da
precipitacao
% que distingue um evento de outro. Este valor esta
% associado ao tempo de resposta da bacia hidrografica apos a
precipitacao.
intervalo_entre_eventos = 24;

%[DEFINIDO PELO USUARIO]
%chuva considerada significativa para analise (mm).
%sao considerados como eventos apenas os episodios em que a precipitacao
%maxima e igual ou superior a chuva significativa.
ChuvaConsiderada = 0.5;

%% PROCESSAMENTO
```

```

%%criar pasta para salvar arquivos de dados e graficos
parentFolder = strcat(pasta,'eventos');
folderName = nome;
mkdir(parentFolder, folderName);

parentFolder = strcat(pasta,'eventos\', nome, '\');
folderName = 'dados';
mkdir(parentFolder, folderName);

parentFolder = strcat(pasta,'eventos\', nome, '\');
folderName = 'graficos';
mkdir(parentFolder, folderName);

%variaveis
intervalo = round(intervalo_entre_eventos*3600*freq);
comp = length(chuva);
i = 0;
num_evento = 0;
EventoChuva = [];
EventoSedimento = [];
EventoVazao = [];
EventoEvapotranspiracao = [];
EventoData = {};

while i < comp
    i = i + 1;
    j = 1;
    cond_evento = 0;

    if chuva(i) > 0

        num_evento = num_evento + 1;
        posicao_inicial = i;

        while cond_evento ~= intervalo

            EventoChuva(j) = chuva(i);
            EventoSedimento(j) = sedimento(i);
            EventoVazao(j) = vazao(i);
            EventoEvapotranspiracao(j) = evapo(i);
            EventoData(j) = data(i);

            if chuva(i) > 0
                cond_evento = 0;
            else
                cond_evento = cond_evento + 1;
            end

            i = i + 1;
            j = j + 1;

            if i == comp
                cond_evento = intervalo;
            end

        end

    end

    if max(EventoChuva) > ChuvaConsiderada

```

```

%%criar arquivo com dados do evento
filename = strcat(pasta, 'eventos\', nome, '\dados\', ...
    nome, '_Evento_', int2str(num_evento), '.xlsx');

%%criar arquivo com dados do evento
A = transpose(EventoData);
aba = 'data';
xlswrite(filename,A,aba);

A = transpose(EventoChuva);
aba = 'chuva';
xlswrite(filename,A,aba);

A = transpose(EventoVazao);
aba = 'vazao';
xlswrite(filename,A,aba);

A = transpose(EventoSedimento);
aba = 'sedimento';
xlswrite(filename,A,aba);

A = transpose(EventoEvapotranspiracao);
aba = 'evapotranspiracao';
xlswrite(filename,A,aba);

%%criar grafico de cada evento
fig = figure;
set(fig, 'units', 'centimeters');
set(fig, 'Position', [0, 0, 16, 10]);
set(fig, 'visible', 'off');

% subgrafico de precipitacao
subplot(2,1,1);
rgb = [0.3 0.3 0.4];
bar((1:length(EventoChuva))*(1/freq)/3600,EventoChuva,...
    'FaceColor',rgb,'EdgeColor',rgb);
set(gca, 'YDir','reverse');
set(gca, 'xtick', []);
set(gca, 'xcolor', 'none');
set(gca, 'box', 'off');
set(gca, 'fontsize', 10);
set(gca, 'FontName', 'Times New Roman');
set(gca, 'units', 'centimeters');
set(gca, 'OuterPosition', [0, 7, 16, 3]);
ylim([0 max(EventoChuva)*1.1]);
xlim([0 length(EventoChuva)*(1/freq)/3600]);
ylabel('Precipitação (mm)', 'fontsize', 10, 'FontName', ...
    'Times New Roman');

title(strcat("Evento de: ", EventoData{1}, ' (i = ', ...
    int2str(posicao_inicial), ')'), 'fontsize', 10, ...
    'FontName', 'Times New Roman');

% subgrafico de vazao e sedimentos
subplot(2,1,2);
set(gca, 'units', 'centimeters');
set(gca, 'OuterPosition', [0, 0, 16, 7]);

```

```

yyaxis left
plot((1:length(EventoChuva))*(1/freq)/3600, ...
EventoVazao,'b');
set(gca, 'fontsize', 10);
set(gca, 'FontName', 'Times New Roman');
set(gca,'ycolor','k');
set(gca, 'box', 'off');
ylim([0 max(EventoVazao)*1.3]);
xlim([0 length(EventoVazao)*(1/freq)/3600]);
ylabel('Vazão (mm/min)', 'fontsize', 10, 'FontName', ...
'Times New Roman');

yyaxis right
plot((1:length(EventoChuva))*(1/freq)/3600,...
EventoSedimento,'k');
set(gca, 'fontsize', 10);
set(gca, 'FontName', 'Times New Roman');
set(gca,'ycolor','k');
set(gca, 'box', 'off');
ylim([0 max(EventoSedimento)*1.3]);
xlim([0 length(EventoSedimento)*(1/freq)/3600]);
ylabel('Descarga de Sedimentos (ton/min)', 'fontsize', ...
10, 'FontName', 'Times New Roman');

xlabel('Tempo (h)', 'fontsize', 10, 'FontName',...
'Times New Roman');
legend({'Vazão', 'Descarga de Sedimentos'},...
'FontSize',8, 'Location', 'Northeast', 'Orientation',...
'vertical', 'box', 'off');

filename = strcat(pasta, 'eventos\', nome, '\graficos\',...
'Evento_', nome, '_', int2str(num_evento), '.png');
saveas(fig, filename);

EventoChuva = [];
EventoSedimento = [];
EventoVazao = [];
EventoEvapotranspiracao = [];
EventoData = {};

else

num_evento = num_evento - 1;

end

i = i - 1;

end
end

```

APÊNDICE L

Função utilizada para calcular os valores estimados de escoamento pelo Tank Model

```
function f = tank_model_2tk(parametros, precipitacao, evapotranspiracao)

%% function f = tank_model_2tk(parametros, precipitacao,
evapotranspiracao)
% descricao: essa funcao calcula os valores estimados de escoamento pelo
tank model.
% entradas:
% parametros - vetor de parametros do tank model;
% precipitacao - dados de precipitacao;
% evapotranspiracao - dados de evapotranspiracao.
% saida: vetor de valores estimados de escoamento

%% Tank Model

% parametros do modelo

% armazenamento inicial
S1 = parametros(1);
S2 = parametros(2);

% escoamento vertical
A0 = parametros(3);
B0 = parametros(4);

% escoamento horizontal
A1 = parametros(5);
A2 = parametros(6);
B1 = parametros(7);

% altura das saidas laterais
HA1 = parametros(8);
HA2 = parametros(9);
HB1 = parametros(10);

% processamento

Q = [length(precipitacao),1];

for i = 1:length(precipitacao)

    % tanque 1

    % armazenamento inicial S1
    if S1 + precipitacao(i) - evapotranspiracao(i) > 0
        S1 = S1 + precipitacao(i) - evapotranspiracao(i);
        ETR = 0;
    else
        ETR = evapotranspiracao(i) - (S1 + precipitacao(i));
        S1 = 0;
    end

    % infiltracao f1
    f1 = S1*A0;
```

```

% escoamento lateral q1
if S1 > HA1
    q1 = (S1-HA1)*A1;
else
    q1 = 0;
end

% escoamento lateral q2
if S1 > HA2
    q2 = (S1-HA2)*A2;
else
    q2 = 0;
end

% armazenamento final S1
S1 = S1 - f1 - q1 - q2;

% tanque 2

% armazenamento inicial S2
if S2 + f1 - ETR > 0
    S2 = S2 + f1 - ETR;
else
    ETR = ETR - (S2 + f1);
    S2 = 0;
end

% infiltraçao f2
f2 = S2*B0;

% escoamento lateral q3
if S2 > HB1
    q3 = (S2-HB1)*B1;
else
    q3 = 0;
end

% armazenamento final S2
S2 = S2 - f2 - q3;

% escoamento total Q
Q(i) = q1 + q2 + q3;

end

f = Q;

```

APÊNDICE M

Função utilizada para calcular os valores estimados de descarga de sedimentos pelo Tank Model

```
function f = tank_model_2tk(nome,parametros_sedimento, precipitacao,...
    evapotranspiracao)

%% function f = tank_model_2tk(nome,parametros_sedimento, precipitacao,
% evapotranspiracao)
% descricao: essa funcao calcula os valores estimados de descarga de
% sedimentos pelo tank model.
% entradas:
% nome - nome da bacia hidrografica;
% parametros_sedimento - vetor de parametros do tank model relacionados
% a descarga de sedimentos;
% precipitacao - dados de precipitacao;
% evapotranspiracao - dados de evapotranspiracao.
% saida: vetor de valores estimados de descarga de sedimentos.

%% Tank Model

% parametros do modelo

% ler parametros
evento = strcat('Parametros\',nome, '.txt');
parametros = textread(evento);

% armazenamento inicial
S1 = parametros(1);
S2 = parametros(2);

% escoamento vertical
A0 = parametros(3);
B0 = parametros(4);

% escoamento horizontal
A1 = parameters(5);
A2 = parameters(6);
B1 = parameters(7);

% altura das saidas laterais
HA1 = parameters(8);
HA2 = parameters(9);
HB1 = parameters(10);

% parametros de sedimento
X = parametros_sedimento(1);
SM1 = parametros_sedimento(2);

% Processamento

Q = [];
SQ = [];

for i = 1:length(precipitacao)

    % tanque 1
```

```

% armazenamento inicial S1
if S1 + precipitacao(i) - evapotranspiracao(i) > 0
    S1 = S1 + precipitacao(i) - evapotranspiracao(i);
    ETR = 0;
else
    ETR = evapotranspiracao(i) - (S1 + precipitacao(i));
    S1 = 0;
end

% massa de sedimentos inicial SM1
SM1 = SM1 + precipitacao(i)*X;

% infiltracao f1
f1 = S1*A0;

% infiltracao de sedimentos sf1
if S1 > 0
    sf1 = f1*(SM1/S1);
else
    sf1 = 0;
end

% escoamento lateral q1
if S1 > HA1
    q1 = (S1-HA1)*A1;
else
    q1 = 0;
end

% escoamento lateral q2
if S1 > HA2
    q2 = (S1-HA2)*A2;
else
    q2 = 0;
end

% descarga de sedimentos lateral sq1
if S1 > 0
    sq1 = q1*(SM1/S1);
else
    sq1 = 0;
end

% descarga de sedimentos lateral sq2
if S1 > 0
    sq2 = q2*(SM1/S1);
else
    sq2 = 0;
end

% armazenamento final S1
S1 = S1 - f1 - q1 - q2;

% massa de sedimentos final SM1
SM1 = SM1 - sq1 - sq2 - sf1;

% tanque 2

% armazenamento inicial S2
if S2 + f1 - ETR > 0
    S2 = S2 + f1 - ETR;

```

```
else
    ETR = ETR - (S2 + f1);
    S2 = 0;
end

% infiltraçao f2
f2 = S2*B0;

% escoamento lateral q3
if S2 > HB1
    q3 = (S2-HB1)*B1;
else
    q3 = 0;
end

% armazenamento final S2
S2 = S2 - f2 - q3;

% escoamento total Q
Q(i,1) = q1 + q2 + q3;

% descarga de sedimentos total SQ
SQ(i,1) = sq1 + sq2;

end

f = SQ;
```

APÊNDICE N

Tabela 41 – Matriz de correlação das métricas das características da bacia hidrográfica utilizadas na análise de regressão dos parâmetros fundamentais do Tank Model

Variáveis	Ab	Pe	Am	Kc	Kf	Ic	Dm	Dp	Dso	Do	Dfo	Dmo	De	Dr
Ab	1,00	0,99	0,13	0,66	-0,94	-0,66	-0,21	0,16	0,45	0,20	-0,43	-0,16	-0,20	1,00
Pe	0,99	1,00	0,02	0,71	-0,97	-0,71	-0,10	0,06	0,35	0,09	-0,34	-0,05	-0,09	1,00
Am	0,13	0,02	1,00	-0,43	0,20	0,40	-0,99	0,92	0,89	0,98	-0,81	-1,00	-1,00	0,04
Kc	0,66	0,71	-0,43	1,00	-0,86	-1,00	0,29	-0,16	0,03	-0,29	-0,14	0,38	0,38	0,70
Kf	-0,94	-0,97	0,20	-0,86	1,00	0,85	-0,09	0,09	-0,20	0,10	0,22	-0,16	-0,13	-0,96
Ic	-0,66	-0,71	0,40	-1,00	0,85	1,00	-0,26	0,12	-0,06	0,25	0,18	-0,35	-0,35	-0,69
Dm	-0,21	-0,10	-0,99	0,29	-0,09	-0,26	1,00	-0,96	-0,95	-1,00	0,89	1,00	0,99	-0,12
Dp	0,16	0,06	0,92	-0,16	0,09	0,12	-0,96	1,00	0,95	0,97	-0,95	-0,94	-0,92	0,08
Dso	0,45	0,35	0,89	0,03	-0,20	-0,06	-0,95	0,95	1,00	0,95	-0,98	-0,91	-0,91	0,37
Do	0,20	0,09	0,98	-0,29	0,10	0,25	-1,00	0,97	0,95	1,00	-0,90	-0,99	-0,99	0,11
Dfo	-0,43	-0,34	-0,81	-0,14	0,22	0,18	0,89	-0,95	-0,98	-0,90	1,00	0,85	0,83	-0,35
Dmo	-0,16	-0,05	-1,00	0,38	-0,16	-0,35	1,00	-0,94	-0,91	-0,99	0,85	1,00	1,00	-0,07
De	-0,20	-0,09	-1,00	0,38	-0,13	-0,35	0,99	-0,92	-0,91	-0,99	0,83	1,00	1,00	-0,11
Dr	1,00	1,00	0,04	0,70	-0,96	-0,69	-0,12	0,08	0,37	0,11	-0,35	-0,07	-0,11	1,00
Ct	1,00	1,00	0,07	0,69	-0,95	-0,69	-0,16	0,11	0,41	0,15	-0,38	-0,11	-0,15	1,00
Dd	-0,72	-0,64	-0,78	-0,13	0,46	0,16	0,83	-0,76	-0,92	-0,82	0,85	0,80	0,82	-0,66
DCGMGLgno	-0,20	-0,09	-1,00	0,38	-0,12	-0,35	0,99	-0,92	-0,91	-0,99	0,83	1,00	1,00	-0,12
DCGR2salc	-0,20	-0,09	-1,00	0,38	-0,12	-0,35	0,99	-0,92	-0,91	-0,99	0,83	1,00	1,00	-0,12
DSVMPasaf	0,20	0,09	1,00	-0,38	0,12	0,35	-0,99	0,92	0,91	0,99	-0,83	-1,00	-1,00	0,12
Ghb	-0,20	-0,09	-1,00	0,38	-0,12	-0,35	0,99	-0,92	-0,91	-0,99	0,83	1,00	1,00	-0,12
Ghc	0,99	0,97	0,26	0,62	-0,89	-0,63	-0,35	0,31	0,58	0,34	-0,56	-0,29	-0,33	0,97
Ghd	-0,54	-0,63	0,76	-0,83	0,78	0,80	-0,69	0,65	0,44	0,69	-0,38	-0,74	-0,71	-0,61
Usf	-0,91	-0,95	0,28	-0,85	0,99	0,84	-0,18	0,18	-0,10	0,19	0,12	-0,24	-0,21	-0,94
Usr	0,91	0,86	0,51	0,43	-0,74	-0,45	-0,59	0,54	0,77	0,58	-0,73	-0,54	-0,57	0,87
Uss	0,56	0,65	-0,75	0,84	-0,80	-0,82	0,67	-0,63	-0,41	-0,67	0,35	0,72	0,70	0,63
Usp	0,07	0,18	-0,98	0,60	-0,39	-0,57	0,94	-0,87	-0,78	-0,94	0,70	0,97	0,96	0,15
Use	0,98	0,99	-0,06	0,70	-0,97	-0,69	-0,02	-0,05	0,26	0,00	-0,23	0,03	-0,01	0,99
Usa	0,78	0,71	0,68	0,08	-0,51	-0,09	-0,70	0,56	0,77	0,68	-0,66	-0,68	-0,73	0,73

(conclusão)

Variáveis	Ct	Dd	DCGMGLgno	DCGR2salc	DSVMPasaf	Ghb	Ghc	Ghd	Usf	Usr	Uss	Usp	Use	Usa
Ab	1,00	-0,72	-0,20	-0,20	0,20	-0,20	0,99	-0,54	-0,91	0,91	0,56	0,07	0,98	0,78
Pe	1,00	-0,64	-0,09	-0,09	0,09	-0,09	0,97	-0,63	-0,95	0,86	0,65	0,18	0,99	0,71
Am	0,07	-0,78	-1,00	-1,00	1,00	-1,00	0,26	0,76	0,28	0,51	-0,75	-0,98	-0,06	0,68
Kc	0,69	-0,13	0,38	0,38	-0,38	0,38	0,62	-0,83	-0,85	0,43	0,84	0,60	0,70	0,08
Kf	-0,95	0,46	-0,12	-0,12	0,12	-0,12	-0,89	0,78	0,99	-0,74	-0,80	-0,39	-0,97	-0,51
Ic	-0,69	0,16	-0,35	-0,35	0,35	-0,35	-0,63	0,80	0,84	-0,45	-0,82	-0,57	-0,69	-0,09
Dm	-0,16	0,83	0,99	0,99	-0,99	0,99	-0,35	-0,69	-0,18	-0,59	0,67	0,94	-0,02	-0,70
Dp	0,11	-0,76	-0,92	-0,92	0,92	-0,92	0,31	0,65	0,18	0,54	-0,63	-0,87	-0,05	0,56
Dso	0,41	-0,92	-0,91	-0,91	0,91	-0,91	0,58	0,44	-0,10	0,77	-0,41	-0,78	0,26	0,77
Do	0,15	-0,82	-0,99	-0,99	0,99	-0,99	0,34	0,69	0,19	0,58	-0,67	-0,94	0,00	0,68
Dfo	-0,38	0,85	0,83	0,83	-0,83	0,83	-0,56	-0,38	0,12	-0,73	0,35	0,70	-0,23	-0,66
Dmo	-0,11	0,80	1,00	1,00	-1,00	1,00	-0,29	-0,74	-0,24	-0,54	0,72	0,97	0,03	-0,68
De	-0,15	0,82	1,00	1,00	-1,00	1,00	-0,33	-0,71	-0,21	-0,57	0,70	0,96	-0,01	-0,73
Dr	1,00	-0,66	-0,12	-0,12	0,12	-0,12	0,97	-0,61	-0,94	0,87	0,63	0,15	0,99	0,73
Ct	1,00	-0,68	-0,15	-0,15	0,15	-0,15	0,98	-0,59	-0,93	0,89	0,60	0,12	0,99	0,75
Dd	-0,68	1,00	0,83	0,83	-0,83	0,83	-0,81	-0,19	0,38	-0,94	0,17	0,64	-0,57	-0,96
DCGMGLgno	-0,15	0,83	1,00	1,00	-1,00	1,00	-0,33	-0,71	-0,20	-0,58	0,69	0,96	-0,02	-0,73
DCGR2salc	-0,15	0,83	1,00	1,00	-1,00	1,00	-0,33	-0,71	-0,20	-0,58	0,69	0,96	-0,02	-0,73
DSVMPasaf	0,15	-0,83	-1,00	-1,00	1,00	-1,00	0,33	0,71	0,20	0,58	-0,69	-0,96	0,02	0,73
Ghb	-0,15	0,83	1,00	1,00	-1,00	1,00	-0,33	-0,71	-0,20	-0,58	0,69	0,96	-0,02	-0,73
Ghc	0,98	-0,81	-0,33	-0,33	0,33	-0,33	1,00	-0,43	-0,86	0,96	0,45	-0,06	0,94	0,83
Ghd	-0,59	-0,19	-0,71	-0,71	0,71	-0,71	-0,43	1,00	0,83	-0,16	-1,00	-0,87	-0,68	0,08
Usf	-0,93	0,38	-0,20	-0,20	0,20	-0,20	-0,86	0,83	1,00	-0,68	-0,85	-0,46	-0,96	-0,46
Usr	0,89	-0,94	-0,58	-0,58	0,58	-0,58	0,96	-0,16	-0,68	1,00	0,19	-0,33	0,81	0,93
Uss	0,60	0,17	0,69	0,69	-0,69	0,69	0,45	-1,00	-0,85	0,19	1,00	0,86	0,69	-0,06
Usp	0,12	0,64	0,96	0,96	-0,96	0,96	-0,06	-0,87	-0,46	-0,33	0,86	1,00	0,25	-0,54
Use	0,99	-0,57	-0,02	-0,02	0,02	-0,02	0,94	-0,68	-0,96	0,81	0,69	0,25	1,00	0,67
Usa	0,75	-0,96	-0,73	-0,73	0,73	-0,73	0,83	0,08	-0,46	0,93	-0,06	-0,54	0,67	1,00

Tabela 42 – Matriz de correlação das métricas das características da bacia hidrográfica utilizadas na análise de regressão dos parâmetros relacionados ao armazenamento inicial dos tanques

Variáveis	Ab	Pe	Am	Kc	Kf	Ic	Dm	Dp	Dso	Do	Dfo	Dmo	De	Dr	Ct	Dd	DCGMGLgno
Ab	1,00	0,99	0,13	0,66	-0,94	-0,66	-0,21	0,16	0,45	0,20	-0,43	-0,16	-0,20	1,00	1,00	-0,72	-0,20
Pe	0,99	1,00	0,02	0,71	-0,97	-0,71	-0,10	0,06	0,35	0,09	-0,34	-0,05	-0,09	1,00	1,00	-0,64	-0,09
Am	0,13	0,02	1,00	-0,43	0,20	0,40	-0,99	0,92	0,89	0,98	-0,81	-1,00	-1,00	0,04	0,07	-0,78	-1,00
Kc	0,66	0,71	-0,43	1,00	-0,86	-1,00	0,29	-0,16	0,03	-0,29	-0,14	0,38	0,38	0,70	0,69	-0,13	0,38
Kf	-0,94	-0,97	0,20	-0,86	1,00	0,85	-0,09	0,09	-0,20	0,10	0,22	-0,16	-0,13	-0,96	-0,95	0,46	-0,12
Ic	-0,66	-0,71	0,40	-1,00	0,85	1,00	-0,26	0,12	-0,06	0,25	0,18	-0,35	-0,35	-0,69	-0,69	0,16	-0,35
Dm	-0,21	-0,10	-0,99	0,29	-0,09	-0,26	1,00	-0,96	-0,95	-1,00	0,89	1,00	0,99	-0,12	-0,16	0,83	0,99
Dp	0,16	0,06	0,92	-0,16	0,09	0,12	-0,96	1,00	0,95	0,97	-0,95	-0,94	-0,92	0,08	0,11	-0,76	-0,92
Dso	0,45	0,35	0,89	0,03	-0,20	-0,06	-0,95	0,95	1,00	0,95	-0,98	-0,91	-0,91	0,37	0,41	-0,92	-0,91
Do	0,20	0,09	0,98	-0,29	0,10	0,25	-1,00	0,97	0,95	1,00	-0,90	-0,99	-0,99	0,11	0,15	-0,82	-0,99
Dfo	-0,43	-0,34	-0,81	-0,14	0,22	0,18	0,89	-0,95	-0,98	-0,90	1,00	0,85	0,83	-0,35	-0,38	0,85	0,83
Dmo	-0,16	-0,05	-1,00	0,38	-0,16	-0,35	1,00	-0,94	-0,91	-0,99	0,85	1,00	1,00	-0,07	-0,11	0,80	1,00
De	-0,20	-0,09	-1,00	0,38	-0,13	-0,35	0,99	-0,92	-0,91	-0,99	0,83	1,00	1,00	-0,11	-0,15	0,82	1,00
Dr	1,00	1,00	0,04	0,70	-0,96	-0,69	-0,12	0,08	0,37	0,11	-0,35	-0,07	-0,11	1,00	1,00	-0,66	-0,12
Ct	1,00	1,00	0,07	0,69	-0,95	-0,69	-0,16	0,11	0,41	0,15	-0,38	-0,11	-0,15	1,00	1,00	-0,68	-0,15
Dd	-0,72	-0,64	-0,78	-0,13	0,46	0,16	0,83	-0,76	-0,92	-0,82	0,85	0,80	0,82	-0,66	-0,68	1,00	0,83
DCGMGLgno	-0,20	-0,09	-1,00	0,38	-0,12	-0,35	0,99	-0,92	-0,91	-0,99	0,83	1,00	1,00	-0,12	-0,15	0,83	1,00
DCGR2salc	-0,20	-0,09	-1,00	0,38	-0,12	-0,35	0,99	-0,92	-0,91	-0,99	0,83	1,00	1,00	-0,12	-0,15	0,83	1,00
DSVMPasaf	0,20	0,09	1,00	-0,38	0,12	0,35	-0,99	0,92	0,91	0,99	-0,83	-1,00	-1,00	0,12	0,15	-0,83	-1,00
Ghb	-0,20	-0,09	-1,00	0,38	-0,12	-0,35	0,99	-0,92	-0,91	-0,99	0,83	1,00	1,00	-0,12	-0,15	0,83	1,00
Ghc	0,99	0,97	0,26	0,62	-0,89	-0,63	-0,35	0,31	0,58	0,34	-0,56	-0,29	-0,33	0,97	0,98	-0,81	-0,33
Ghd	-0,54	-0,63	0,76	-0,83	0,78	0,80	-0,69	0,65	0,44	0,69	-0,38	-0,74	-0,71	-0,61	-0,59	-0,19	-0,71
Usf	-0,91	-0,95	0,28	-0,85	0,99	0,84	-0,18	0,18	-0,10	0,19	0,12	-0,24	-0,21	-0,94	-0,93	0,38	-0,20
Usr	0,91	0,86	0,51	0,43	-0,74	-0,45	-0,59	0,54	0,77	0,58	-0,73	-0,54	-0,57	0,87	0,89	-0,94	-0,58
Uss	0,56	0,65	-0,75	0,84	-0,80	-0,82	0,67	-0,63	-0,41	-0,67	0,35	0,72	0,70	0,63	0,60	0,17	0,69
Usp	0,07	0,18	-0,98	0,60	-0,39	-0,57	0,94	-0,87	-0,78	-0,94	0,70	0,97	0,96	0,15	0,12	0,64	0,96
Use	0,98	0,99	-0,06	0,70	-0,97	-0,69	-0,02	-0,05	0,26	0,00	-0,23	0,03	-0,01	0,99	0,99	-0,57	-0,02
Usa	0,78	0,71	0,68	0,08	-0,51	-0,09	-0,70	0,56	0,77	0,68	-0,66	-0,68	-0,73	0,73	0,75	-0,96	-0,73
Ipa1	-0,13	-0,06	-0,65	0,25	-0,08	-0,23	0,65	-0,60	-0,60	-0,65	0,55	0,65	0,65	-0,08	-0,10	0,54	0,65
Ipa2	-0,14	-0,07	-0,65	0,24	-0,07	-0,22	0,65	-0,60	-0,60	-0,64	0,55	0,65	0,65	-0,08	-0,10	0,54	0,65
Ipa3	-0,16	-0,09	-0,64	0,24	-0,05	-0,22	0,63	-0,57	-0,58	-0,63	0,52	0,64	0,64	-0,11	-0,13	0,55	0,64
Ipa4	-0,18	-0,11	-0,62	0,24	-0,03	-0,22	0,61	-0,55	-0,56	-0,61	0,50	0,62	0,63	-0,13	-0,15	0,54	0,63
Ipa5	-0,18	-0,12	-0,61	0,23	-0,03	-0,21	0,60	-0,53	-0,55	-0,59	0,49	0,60	0,61	-0,13	-0,15	0,54	0,61
Ipa6	-0,14	-0,09	-0,46	0,19	-0,02	-0,17	0,45	-0,39	-0,41	-0,45	0,36	0,46	0,47	-0,11	-0,12	0,41	0,47
Ipa7	-0,13	-0,09	-0,39	0,14	-0,01	-0,13	0,38	-0,34	-0,35	-0,38	0,31	0,39	0,39	-0,10	-0,11	0,35	0,39

(conclusão)

Variáveis	DCGR2salc	DSVMPasaf	Ghb	Ghc	Ghd	Usf	Usr	Uss	Usp	Use	Usa	Ipa1	Ipa2	Ipa3	Ipa4	Ipa5	Ipa6	Ipa7
Ab	-0,20	0,20	-0,20	0,99	-0,54	-0,91	0,91	0,56	0,07	0,98	0,78	-0,13	-0,14	-0,16	-0,18	-0,18	-0,14	-0,13
Pe	-0,09	0,09	-0,09	0,97	-0,63	-0,95	0,86	0,65	0,18	0,99	0,71	-0,06	-0,07	-0,09	-0,11	-0,12	-0,09	-0,09
Am	-1,00	1,00	-1,00	0,26	0,76	0,28	0,51	-0,75	-0,98	-0,06	0,68	-0,65	-0,65	-0,64	-0,62	-0,61	-0,46	-0,39
Kc	0,38	-0,38	0,38	0,62	-0,83	-0,85	0,43	0,84	0,60	0,70	0,08	0,25	0,24	0,24	0,24	0,23	0,19	0,14
Kf	-0,12	0,12	-0,12	-0,89	0,78	0,99	-0,74	-0,80	-0,39	-0,97	-0,51	-0,08	-0,07	-0,05	-0,03	-0,03	-0,02	-0,01
Ic	-0,35	0,35	-0,35	-0,63	0,80	0,84	-0,45	-0,82	-0,57	-0,69	-0,09	-0,23	-0,22	-0,22	-0,22	-0,21	-0,17	-0,13
Dm	0,99	-0,99	0,99	-0,35	-0,69	-0,18	-0,59	0,67	0,94	-0,02	-0,70	0,65	0,65	0,63	0,61	0,60	0,45	0,38
Dp	-0,92	0,92	-0,92	0,31	0,65	0,18	0,54	-0,63	-0,87	-0,05	0,56	-0,60	-0,60	-0,57	-0,55	-0,53	-0,39	-0,34
Dso	-0,91	0,91	-0,91	0,58	0,44	-0,10	0,77	-0,41	-0,78	0,26	0,77	-0,60	-0,60	-0,58	-0,56	-0,55	-0,41	-0,35
Do	-0,99	0,99	-0,99	0,34	0,69	0,19	0,58	-0,67	-0,94	0,00	0,68	-0,65	-0,64	-0,63	-0,61	-0,59	-0,45	-0,38
Dfo	0,83	-0,83	0,83	-0,56	-0,38	0,12	-0,73	0,35	0,70	-0,23	-0,66	0,55	0,55	0,52	0,50	0,49	0,36	0,31
Dmo	1,00	-1,00	1,00	-0,29	-0,74	-0,24	-0,54	0,72	0,97	0,03	-0,68	0,65	0,65	0,64	0,62	0,60	0,46	0,39
De	1,00	-1,00	1,00	-0,33	-0,71	-0,21	-0,57	0,70	0,96	-0,01	-0,73	0,65	0,65	0,64	0,63	0,61	0,47	0,39
Dr	-0,12	0,12	-0,12	0,97	-0,61	-0,94	0,87	0,63	0,15	0,99	0,73	-0,08	-0,08	-0,11	-0,13	-0,13	-0,11	-0,10
Ct	-0,15	0,15	-0,15	0,98	-0,59	-0,93	0,89	0,60	0,12	0,99	0,75	-0,10	-0,10	-0,13	-0,15	-0,15	-0,12	-0,11
Dd	0,83	-0,83	0,83	-0,81	-0,19	0,38	-0,94	0,17	0,64	-0,57	-0,96	0,54	0,54	0,55	0,54	0,54	0,41	0,35
DCGMGLgno	1,00	-1,00	1,00	-0,33	-0,71	-0,20	-0,58	0,69	0,96	-0,02	-0,73	0,65	0,65	0,64	0,63	0,61	0,47	0,39
DCGR2salc	1,00	-1,00	1,00	-0,33	-0,71	-0,20	-0,58	0,69	0,96	-0,02	-0,73	0,65	0,65	0,64	0,63	0,61	0,47	0,39
DSVMPasaf	-1,00	1,00	-1,00	0,33	0,71	0,20	0,58	-0,69	-0,96	0,02	0,73	-0,65	-0,65	-0,64	-0,63	-0,61	-0,47	-0,39
Ghb	1,00	-1,00	1,00	-0,33	-0,71	-0,20	-0,58	0,69	0,96	-0,02	-0,73	0,65	0,65	0,64	0,63	0,61	0,47	0,39
Ghc	-0,33	0,33	-0,33	1,00	-0,43	-0,86	0,96	0,45	-0,06	0,94	0,83	-0,22	-0,22	-0,24	-0,25	-0,25	-0,20	-0,17
Ghd	-0,71	0,71	-0,71	-0,43	1,00	0,83	-0,16	-1,00	-0,87	-0,68	0,08	-0,46	-0,46	-0,43	-0,41	-0,40	-0,30	-0,25
Usf	-0,20	0,20	-0,20	-0,86	0,83	1,00	-0,68	-0,85	-0,46	-0,96	-0,46	-0,13	-0,13	-0,10	-0,08	-0,07	-0,05	-0,04
Usr	-0,58	0,58	-0,58	0,96	-0,16	-0,68	1,00	0,19	-0,33	0,81	0,93	-0,38	-0,38	-0,39	-0,40	-0,40	-0,30	-0,26
Uss	0,69	-0,69	0,69	0,45	-1,00	-0,85	0,19	1,00	0,86	0,69	-0,06	0,45	0,45	0,42	0,40	0,39	0,29	0,24
Usp	0,96	-0,96	0,96	-0,06	-0,87	-0,46	-0,33	0,86	1,00	0,25	-0,54	0,63	0,63	0,61	0,59	0,58	0,44	0,37
Use	-0,02	0,02	-0,02	0,94	-0,68	-0,96	0,81	0,69	0,25	1,00	0,67	-0,01	-0,01	-0,05	-0,07	-0,08	-0,07	-0,06
Usa	-0,73	0,73	-0,73	0,83	0,08	-0,46	0,93	-0,06	-0,54	0,67	1,00	-0,48	-0,48	-0,50	-0,51	-0,50	-0,39	-0,33
Ipa1	0,65	-0,65	0,65	-0,22	-0,46	-0,13	-0,38	0,45	0,63	-0,01	-0,48	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,92	0,89
Ipa2	0,65	-0,65	0,65	-0,22	-0,46	-0,13	-0,38	0,45	0,63	-0,01	-0,48	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,92	0,89
Ipa3	0,64	-0,64	0,64	-0,24	-0,43	-0,10	-0,39	0,42	0,61	-0,05	-0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,91	0,88
Ipa4	0,63	-0,63	0,63	-0,25	-0,41	-0,08	-0,40	0,40	0,59	-0,07	-0,51	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	0,91	0,88
Ipa5	0,61	-0,61	0,61	-0,25	-0,40	-0,07	-0,40	0,39	0,58	-0,08	-0,50	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	0,93	0,90
Ipa6	0,47	-0,47	0,47	-0,20	-0,30	-0,05	-0,30	0,29	0,44	-0,07	-0,39	0,92	0,92	0,91	0,91	0,93	1,00	0,99
Ipa7	0,39	-0,39	0,39	-0,17	-0,25	-0,04	-0,26	0,24	0,37	-0,06	-0,33	0,89	0,89	0,88	0,88	0,90	0,99	1,00

Tabela 43 – Matriz de correlação das métricas das características da bacia hidrográfica utilizadas na análise de regressão dos parâmetros relacionados à condição inicial de sedimentos nos tanques

Variáveis	Ab	Pe	Am	Kc	Kf	Ic	Dm	Dp	Dso	Do	Dfo	Dmo	De	Dr	Ct
Ab	1,00	0,99	0,02	0,57	-0,91	-0,57	-0,09	0,04	0,29	0,07	-0,27	-0,05	-0,08	0,99	1,00
Pe	0,99	1,00	-0,12	0,65	-0,95	-0,64	0,06	-0,09	0,16	-0,07	-0,15	0,10	0,06	1,00	1,00
Am	0,02	-0,12	1,00	-0,56	0,37	0,52	-0,99	0,92	0,90	0,98	-0,82	-1,00	-1,00	-0,09	-0,05
Kc	0,57	0,65	-0,56	1,00	-0,84	-1,00	0,43	-0,26	-0,15	-0,42	0,00	0,51	0,53	0,62	0,61
Kf	-0,91	-0,95	0,37	-0,84	1,00	0,83	-0,29	0,26	0,03	0,29	0,01	-0,34	-0,32	-0,94	-0,93
Ic	-0,57	-0,64	0,52	-1,00	0,83	1,00	-0,40	0,22	0,11	0,38	0,04	-0,47	-0,49	-0,62	-0,61
Dm	-0,09	0,06	-0,99	0,43	-0,29	-0,40	1,00	-0,96	-0,95	-1,00	0,89	1,00	0,99	0,03	-0,02
Dp	0,04	-0,09	0,92	-0,26	0,26	0,22	-0,96	1,00	0,97	0,97	-0,96	-0,94	-0,91	-0,07	-0,02
Dso	0,29	0,16	0,90	-0,15	0,03	0,11	-0,95	0,97	1,00	0,96	-0,98	-0,93	-0,91	0,18	0,23
Do	0,07	-0,07	0,98	-0,42	0,29	0,38	-1,00	0,97	0,96	1,00	-0,90	-0,99	-0,99	-0,04	0,01
Dfo	-0,27	-0,15	-0,82	0,00	0,01	0,04	0,89	-0,96	-0,98	-0,90	1,00	0,85	0,83	-0,17	-0,21
Dmo	-0,05	0,10	-1,00	0,51	-0,34	-0,47	1,00	-0,94	-0,93	-0,99	0,85	1,00	1,00	0,07	0,02
De	-0,08	0,06	-1,00	0,53	-0,32	-0,49	0,99	-0,91	-0,91	-0,99	0,83	1,00	1,00	0,03	-0,01
Dr	0,99	1,00	-0,09	0,62	-0,94	-0,62	0,03	-0,07	0,18	-0,04	-0,17	0,07	0,03	1,00	1,00
Ct	1,00	1,00	-0,05	0,61	-0,93	-0,61	-0,02	-0,02	0,23	0,01	-0,21	0,02	-0,01	1,00	1,00
Dd	-0,58	-0,46	-0,82	0,10	0,22	-0,08	0,86	-0,78	-0,91	-0,85	0,84	0,84	0,85	-0,49	-0,53
DCGMGLgno	-0,08	0,06	-1,00	0,52	-0,31	-0,49	0,99	-0,91	-0,92	-0,99	0,83	1,00	1,00	0,03	-0,02
DCGR2salc	-0,08	0,06	-1,00	0,52	-0,31	-0,49	0,99	-0,91	-0,92	-0,99	0,83	1,00	1,00	0,03	-0,02
DSVMPasaf	0,08	-0,06	1,00	-0,52	0,31	0,49	-0,99	0,91	0,92	0,99	-0,83	-1,00	-1,00	-0,03	0,02
Ghb	-0,08	0,06	-1,00	0,52	-0,31	-0,49	0,99	-0,91	-0,92	-0,99	0,83	1,00	1,00	0,03	-0,02
Ghc	0,98	0,95	0,20	0,51	-0,83	-0,52	-0,27	0,24	0,47	0,26	-0,45	-0,23	-0,25	0,95	0,97
Ghd	-0,50	-0,61	0,86	-0,81	0,80	0,78	-0,81	0,75	0,61	0,81	-0,54	-0,84	-0,83	-0,59	-0,55
Usf	-0,87	-0,93	0,46	-0,83	0,99	0,81	-0,38	0,37	0,14	0,39	-0,11	-0,43	-0,41	-0,92	-0,90
Usr	0,85	0,77	0,53	0,25	-0,59	-0,27	-0,59	0,54	0,74	0,58	-0,69	-0,56	-0,58	0,79	0,82
Uss	0,51	0,62	-0,85	0,83	-0,81	-0,80	0,79	-0,73	-0,59	-0,79	0,52	0,83	0,81	0,60	0,57
Usp	0,13	0,26	-0,99	0,67	-0,51	-0,64	0,96	-0,88	-0,83	-0,95	0,74	0,98	0,98	0,23	0,19
Use	0,97	0,99	-0,21	0,62	-0,95	-0,61	0,16	-0,22	0,04	-0,17	-0,01	0,19	0,15	0,99	0,98
Usa	0,66	0,56	0,71	-0,18	-0,29	0,17	-0,70	0,55	0,72	0,68	-0,59	-0,70	-0,74	0,59	0,62
Ips1	-0,11	0,00	-0,80	0,37	-0,20	-0,34	0,80	-0,74	-0,75	-0,79	0,69	0,80	0,80	-0,02	-0,06
Ips2	-0,17	-0,07	-0,69	0,18	-0,08	-0,15	0,71	-0,71	-0,72	-0,71	0,70	0,70	0,69	-0,09	-0,12

(conclusão)

Variáveis	Dd	DCGMGLgno	DCGR2salc	DSVMPasaf	Ghb	Ghc	Ghd	Usf	Usr	Uss	Usp	Use	Usa	Ips1	Ips2
Ab	-0,58	-0,08	-0,08	0,08	-0,08	0,98	-0,50	-0,87	0,85	0,51	0,13	0,97	0,66	-0,11	-0,17
Pe	-0,46	0,06	0,06	-0,06	0,06	0,95	-0,61	-0,93	0,77	0,62	0,26	0,99	0,56	0,00	-0,07
Am	-0,82	-1,00	-1,00	1,00	-1,00	0,20	0,86	0,46	0,53	-0,85	-0,99	-0,21	0,71	-0,80	-0,69
Kc	0,10	0,52	0,52	-0,52	0,52	0,51	-0,81	-0,83	0,25	0,83	0,67	0,62	-0,18	0,37	0,18
Kf	0,22	-0,31	-0,31	0,31	-0,31	-0,83	0,80	0,99	-0,59	-0,81	-0,51	-0,95	-0,29	-0,20	-0,08
Ic	-0,08	-0,49	-0,49	0,49	-0,49	-0,52	0,78	0,81	-0,27	-0,80	-0,64	-0,61	0,17	-0,34	-0,15
Dm	0,86	0,99	0,99	-0,99	0,99	-0,27	-0,81	-0,38	-0,59	0,79	0,96	0,16	-0,70	0,80	0,71
Dp	-0,78	-0,91	-0,91	0,91	-0,91	0,24	0,75	0,37	0,54	-0,73	-0,88	-0,22	0,55	-0,74	-0,71
Dso	-0,91	-0,92	-0,92	0,92	-0,92	0,47	0,61	0,14	0,74	-0,59	-0,83	0,04	0,72	-0,75	-0,72
Do	-0,85	-0,99	-0,99	0,99	-0,99	0,26	0,81	0,39	0,58	-0,79	-0,95	-0,17	0,68	-0,79	-0,71
Dfo	0,84	0,83	0,83	-0,83	0,83	-0,45	-0,54	-0,11	-0,69	0,52	0,74	-0,01	-0,59	0,69	0,70
Dmo	0,84	1,00	1,00	-1,00	1,00	-0,23	-0,84	-0,43	-0,56	0,83	0,98	0,19	-0,70	0,80	0,70
De	0,85	1,00	1,00	-1,00	1,00	-0,25	-0,83	-0,41	-0,58	0,81	0,98	0,15	-0,74	0,80	0,69
Dr	-0,49	0,03	0,03	-0,03	0,03	0,95	-0,59	-0,92	0,79	0,60	0,23	0,99	0,59	-0,02	-0,09
Ct	-0,53	-0,02	-0,02	0,02	-0,02	0,97	-0,55	-0,90	0,82	0,57	0,19	0,98	0,62	-0,06	-0,12
Dd	1,00	0,86	0,86	-0,86	0,86	-0,72	-0,41	0,13	-0,92	0,40	0,73	-0,37	-0,94	0,71	0,66
DCGMGLgno	0,86	1,00	1,00	-1,00	1,00	-0,26	-0,82	-0,40	-0,58	0,81	0,98	0,15	-0,75	0,80	0,69
DCGR2salc	0,86	1,00	1,00	-1,00	1,00	-0,26	-0,82	-0,40	-0,58	0,81	0,98	0,15	-0,75	0,80	0,69
DSVMPasaf	-0,86	-1,00	-1,00	1,00	-1,00	0,26	0,82	0,40	0,58	-0,81	-0,98	-0,15	0,75	-0,80	-0,69
Ghb	0,86	1,00	1,00	-1,00	1,00	-0,26	-0,82	-0,40	-0,58	0,81	0,98	0,15	-0,75	0,80	0,69
Ghc	-0,72	-0,26	-0,26	0,26	-0,26	1,00	-0,34	-0,78	0,94	0,35	-0,05	0,90	0,75	-0,25	-0,30
Ghd	-0,41	-0,82	-0,82	0,82	-0,82	-0,34	1,00	0,85	0,02	-1,00	-0,92	-0,67	0,29	-0,63	-0,50
Usf	0,13	-0,40	-0,40	0,40	-0,40	-0,78	0,85	1,00	-0,51	-0,86	-0,59	-0,95	-0,23	-0,28	-0,16
Usr	-0,92	-0,58	-0,58	0,58	-0,58	0,94	0,02	-0,51	1,00	0,00	-0,40	0,69	0,90	-0,51	-0,51
Uss	0,40	0,81	0,81	-0,81	0,81	0,35	-1,00	-0,86	0,00	1,00	0,92	0,68	-0,28	0,62	0,48
Usp	0,73	0,98	0,98	-0,98	0,98	-0,05	-0,92	-0,59	-0,40	0,92	1,00	0,34	-0,62	0,77	0,64
Use	-0,37	0,15	0,15	-0,15	0,15	0,90	-0,67	-0,95	0,69	0,68	0,34	1,00	0,51	0,08	0,02
Usa	-0,94	-0,75	-0,75	0,75	-0,75	0,75	0,29	-0,23	0,90	-0,28	-0,62	0,51	1,00	-0,62	-0,53
Ips1	0,71	0,80	0,80	-0,80	0,80	-0,25	-0,63	-0,28	-0,51	0,62	0,77	0,08	-0,62	1,00	0,94
Ips2	0,66	0,69	0,69	-0,69	0,69	-0,30	-0,50	-0,16	-0,51	0,48	0,64	0,02	-0,53	0,94	1,00

APÊNDICE O

Tabela 44 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro *A0*

N=4	Regression Summary for Dependent Variable: A0 (A0 in Parametros_workbook) R= ,99535851 R ² = ,99073856 Adjusted R ² = ,98610784 F(1,2)=213,95 p<,00464 Std.Error of estimate: ,00158					
	β^*	Std. Err. of β^*	β	Std. Err. of β	t(2)	p-value
Intercept			-0,02862	0,002725	-10,501	0,00895
<i>Dm</i>	0,9954	0,0680	0,00178	0,000122	14,627	0,00464

Tabela 45 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro *B0*

N=4	Regression Summary for Dependent Variable: B0 (B0 in Parametros_workbook) R= ,99724308 R ² = ,99449377 Adjusted R ² = ,99174065 F(1,2)=361,22 p<,00276 Std.Error of estimate: ,00002					
	β^*	Std. Err. of β^*	β	Std. Err. of β	t(2)	p-value
Intercept			0,00136	0,0000435	31,185	0,00103
<i>Kf</i>	-0,9972	0,0525	-0,00358	0,0001886	-19,006	0,00276

Tabela 46 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro *A1*

N=4	Regression Summary for Dependent Variable: A1 (A1 in Parametros_workbook) R= ,99981772 R ² = ,99963547 Adjusted R ² = ,99890640 F(2,1)=1371,1 p<,01909 Std.Error of estimate: ,00001					
	β^*	Std. Err. of β^*	β	Std. Err. of β	t(1)	p-value
Intercept			0,001947	0,0000337	57,861	0,01100
<i>Dp</i>	-0,9267	0,0191	-0,000774	0,0000160	-48,486	0,01313
<i>Use</i>	0,3348	0,0191	0,000278	0,0000159	17,515	0,03631

Tabela 47 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro *A2*

N=4	Regression Summary for Dependent Variable: A2 (A2 in Parametros_workbook) R= ,99174889 R ² = ,98356586 Adjusted R ² = ,97534880 F(1,2)=119,70 p<,00825 Std.Error of estimate: ,00509					
	β^*	Std. Err. of β^*	β	Std. Err. of β	t(2)	p-value
Intercept			0,18777	0,014332	13,101	0,00578
<i>Ghd</i>	-0,9917	0,0906	-0,00182	0,000166	-10,941	0,00825

Tabela 48 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro *B1*

N=4	Regression Summary for Dependent Variable: B1 (B1 in Parametros_workbook) R= ,99973541 R ² = ,99947090 Adjusted R ² = ,99841269 F(2,1)=944,50 p<,02300 Std.Error of estimate: ,00000					
	β^*	Std. Err. of β^*	β	Std. Err. of β	t(1)	p-value
Intercept			0,0001357	0,000003631	37,384	0,01703
<i>Usa</i>	1,149	0,0278	0,0000391	0,000000944	41,357	0,01539
<i>Dp</i>	-0,951	0,0278	-0,0000747	0,000002181	-34,242	0,01859

Tabela 49 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro *HA1*

N=4	Regression Summary for Dependent Variable: HA1 (HA1 in Parametros_workbook) R= ,98121959 R ² = ,96279188 Adjusted R ² = ,94418781 F(1,2)=51,752 p<,01878 Std.Error of estimate: 1,4565					
	β^*	Std. Err. of β^*	β	Std. Err. of β	t(2)	p-value
Intercept			0,748	1,517	0,493	0,67097
<i>Usa</i>	0,981	0,136	4,905	0,682	7,194	0,01878

Tabela 50 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro *HA2*

N=4	Regression Summary for Dependent Variable: HA2 (HA2 in Parametros_workbook) R= ,99999983 R ² = ,99999966 Adjusted R ² = ,99999898 F(2,1)=1465E3 p<,00058 Std.Error of estimate: ,01309					
	β^*	Std. Err. of β^*	β	Std. Err. of β	t(1)	p-value
Intercept			413,165	0,30133	1371,136	0,00046
<i>Usf</i>	-1,767	0,00112	-1,931	0,00122	-1582,108	0,00040
<i>Kc</i>	-1,124	0,00112	-131,825	0,13097	-1006,547	0,00063

Tabela 51 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro *HB1*

N=4	Regression Summary for Dependent Variable: HB1 (HB1 in Parametros_workbook) R= ,99965967 R ² = ,99931945 Adjusted R ² = ,99795836 F(2,1)=734,20 p<,02609 Std.Error of estimate: ,70335					
	β^*	Std. Err. of β^*	β	Std. Err. of β	t(1)	p-value
Intercept			11,927	0,806	14,789	0,04298
<i>Use</i>	3,331	0,162	96,488	4,691	20,569	0,03093
<i>Ct</i>	-2,444	0,162	-4,821	0,319	-15,092	0,04212

Tabela 52 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro *S1*

N=8	Regression Summary for Dependent Variable: S1 (S1 in Armazenamento_workbook) R= ,93973330 R ² = ,88309868 Adjusted R ² = ,83633816 F(2,5)=18,886 p<,00467 Std.Error of estimate: ,28427					
	β^*	Std. Err. of β^*	β	Std. Err. of β	t(5)	p-value
Intercept			1,876	0,2207	8,499	0,00037
<i>Usa</i>	-1,949	0,406	-1,200	0,2497	-4,805	0,00486
<i>Usr</i>	1,220	0,406	0,108	0,0359	3,006	0,02988

Tabela 53 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro *S2*

N=8	Regression Summary for Dependent Variable: S2 (S2 in Armazenamento_workbook) R= ,99090791 R ² = ,98189848 Adjusted R ² = ,96832234 F(3,4)=72,325 p<,00061 Std.Error of estimate: 13,922					
	β^*	Std. Err. of β^*	β	Std. Err. of β	t(4)	p-value
Intercept			-3223,303	348,637	-9,245	0,00076
<i>Dp</i>	4,381	0,348	693,107	54,987	12,605	0,00023
<i>Dm</i>	9,456	1,289	107,038	14,587	7,338	0,00184
<i>Dmo</i>	-5,667	1,035	-45,549	8,316	-5,478	0,00541

Tabela 54 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro *X*

N=7	Regression Summary for Dependent Variable: X (X in Sedimento_workbook) R= ,99578859 R ² = ,99159491 Adjusted R ² = ,98991389 F(1,5)=589,88 p<,00000 Std.Error of estimate: ,33517					
	β^*	Std. Err. of β^*	β	Std. Err. of β	t(5)	p-value
Intercept			-7,730	0,4323	-17,881	0,000010
<i>Dm</i>	0,9958	0,0410	0,457	0,0188	24,287	0,000002

Tabela 55 – Resultados da regressão linear múltipla para o parâmetro *SM1*

N=7	Regression Summary for Dependent Variable: SM1 (SM1 in Sedimento_workbook) R= ,99243209 R ² = ,98492146 Adjusted R ² = ,98190575 F(1,5)=326,60 p<,00001 Std.Error of estimate: 16,826					
	β^*	Std. Err. of β^*	β	Std. Err. of β	t(5)	p-value
Intercept			14,870	6,869036	2,165	0,08269
<i>Ghc</i>	0,9924	0,0549	12,417	0,687099	18,072	0,00001