

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

**GABRIELA CRISTINA SANTOS DE FIGUEIREDO**

**CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO MUSLE PARA  
EVENTOS DE CHUVA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOS  
BUGRES/SC**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PORTO ALEGRE**

**2021**

**GABRIELA CRISTINA SANTOS DE FIGUEIREDO**

**CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO MUSLE PARA  
EVENTOS DE CHUVA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOS  
BUGRES/SC**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao curso de Engenharia Ambiental da  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
como parte dos requisitos para a obtenção do  
título de Engenheiro Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Gean Paulo Michel  
Co-orientador: Dr. Franciele Zanandrea

**PORTO ALEGRE**

**2021**

### CIP - Catalogação na Publicação

Figueiredo, Gabriela  
Calibração e validação do modelo MUSLE para eventos  
de chuva na bacia hidrográfica do Rio dos Bugres /  
Gabriela Figueiredo. -- 2021.  
95 f.  
Orientador: Gean Paulo Michel.

Coorientador: Franciele Zanandrea.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto  
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia  
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. MUSLE. 2. Produção de sedimentos. 3. Erosão  
hídrica. 4. Bacia hidrográfica. 5. Rio dos Bugres. I.  
Michel, Gean Paulo, orient. II. Zanandrea, Franciele,  
coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com  
os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

GABRIELA CRISTINA SANTOS DE FIGUEIREDO  
CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO MUSLE PARA EVENTOS DE CHUVA  
NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOS BUGRES/SC

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao curso de Engenharia Ambiental da  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
como parte dos requisitos para a obtenção do  
título de Engenheiro Ambiental

Aprovado em: Porto Alegre, 29 de novembro de 2021.

Prof. Drº Gean Paulo Michel – DOH/IPH/UFRGS  
Orientador

Prof. Drº Fernando Mainardi Fan – DOH/IPH/UFRGS  
Examinador

Bruno Henrique Abatti – PPGRHSA/IPH/UFRGS  
Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à todos que participaram desta etapa importante da minha vida, não foi fácil mas um passo de cada vez e aqui estamos.

Às minhas irmãs, pela parceria e amizade. Ao meu amado companheiro Bernard Obal, por todo carinho, compreensão, suporte e incentivo ao longo de todo curso.

Ao meu orientador Gean Paulo Michel e à minha co-orientadora Franciele Zanandrea, meu muito obrigada pela orientação e apoio nesse último ano. Aos membros da banca, professor Fernando Fan e Bruno Abatti, meus agradecimentos pela disponibilidade e valiosos apontamentos.

Dedico ao meu falecido avô, senhor Gilberto Francisco dos Santos, que será sempre um exemplo de coragem e perseverança para mim.

## RESUMO

FIGUEIREDO, G. C. S. **Calibração e validação do modelo MUSLE para eventos de chuva na Bacia Hidrográfica do Rio dos Bugres/SC**. 2021. 90 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia Ambiental - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2021.

A erosão, com a desagregação, transporte e deposição dos sedimentos, é responsável por uma série de impactos ao meio ambiente. Principalmente durante eventos de chuvas, os sedimentos gerados, dependendo do volume transportado e da velocidade do escoamento superficial, em sua maioria chegam aos corpos d'água e são transportados em suspensão nos rios. Está previsto o uso futuro da bacia em estudo como fonte para o abastecimento de água do município de Rio Negrinho, o que indica a necessidade de assegurar a preservação e qualidade dos recursos hídricos da região. O objetivo deste estudo é calibrar e validar o modelo MUSLE para previsão da produção de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio dos Bugres (RB01 de 66,41 km<sup>2</sup>) e em duas bacias embutidas nesta (RB10 de 11,45 km<sup>2</sup> e RB11 de 6,97 km<sup>2</sup>), utilizando dados do monitoramento de concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e vazão nos exutórios da bacia e das sub-bacias, para o período entre 16 de dezembro de 2011 a 05/11/2012. A série contínua foi separada em eventos de chuvas e, para cada evento, foi feita separação do escoamento e verificação da vazão de pico e volume de escoamento superficial. Os modelos criados definiram coeficientes da MUSLE  $\alpha$  e  $\beta$  para cada bacia e para as três bacias juntas. Além disso, foi feita a análise do erro percentual dos dados simulados em relação aos observados e do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) para cada bacia individualmente e para as três bacias em conjunto. A calibração da RB-01 resultou em  $\alpha$  de 7,86,  $\beta$  de 0,48 e NSE de 0,84, para a RB-10 em  $\alpha$  de 2,30,  $\beta$  de 0,58 e NSE de 0,88, para a RB-11 em  $\alpha$  de 0,02,  $\beta$  de 0,97 e NSE de 0,37, enquanto que para as três bacias em conjunto resultou em  $\alpha$  de 5,00,  $\beta$  de 0,51 e NSE de 0,60. A validação da RB-01 resultou em NSE de 0,78, para a RB-10 em NSE de 0,87, para a RB-11 em NSE de -0,64, e para as três bacias em conjunto resultou em NSE de 0,85. A análise da proporção do erro percentual, em relação aos eventos de validação, entre o calculado pela MUSLE com os coeficientes originais ( $\alpha = 11,8$  e  $\beta = 0,56$ ) sobre o calculado pela MUSLE com os coeficientes calibrados para as bacias, indica uma aproximação dos modelos de 2 a 1000 vezes melhor, à exceção de dois eventos isolados. A avaliação da calibração indica uma aproximação de alta eficiência, com NSE entre bom e aceitável para todas as bacias, indicando uma relação significativa entre a produção de sedimentos na bacia durante o período amostrado e os modelos gerados. O resultado obtido indica que a MUSLE calibrada representa bem a média dos eventos, e que para bacias menores e em eventos de baixa magnitude, tem uma aproximação de menor eficiência.

**Palavras-chave:** Equação Universal de Perda de Solo Modificada. MUSLE. Produção de sedimentos. Erosão hídrica. Bacia hidrográfica. Rio dos Bugres.

## ABSTRACT

FIGUEIREDO, G. C. S.. Calibration and validation of MUSLE model for precipitation events in the Rio dos Bugres (SC) hydrographic basin. 2021. 90 pages. Environmental Engineering graduation course final paper - Federal University of Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2021.

Erosion with detachment, transportation and deposition of sediments is responsible for several environmental impacts. Mainly during rainfall events, the majority of generated sediments, depending on transported volume and surface runoff, flow to waterbodies and are carried on by the rivers, suspended. The basin under study is planned to be used as a water source for the county of Rio Negrinho in Santa Catarina, Brazil, which indicates the importance of ensuring preservation and quality of the region's hydric resources. The main purpose of this study is to calibrate and validate the MUSLE model for predicting sediment production in Rio dos Bugres hydrographic basin (RB01, with 66.41 km<sup>2</sup>) and in two more basins built into the first one (RB10 with 11,45 km<sup>2</sup> and RB11 with 6,7 km<sup>2</sup>), using Suspended Sediment Concentration (SSC) and flow data taken from the outlets of the basin and subbasins between December 16th 2011 until November 5th 2012. The continuous series was split into rainfall events and in each event, flow separation was done and peak flow and surface runoff were obtained. The created models defined MUSLE's  $\alpha$  and  $\beta$  coefficients for each basin and for the three together. The relative error between calibrated and observed data was obtained, as well as the Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE) for each basin individually and for the three together. RB-01 calibration resulted in  $\alpha = 7.86$ ,  $\beta = 0.48$ , NSE = 0,84. RB-10 calibration resulted in  $\alpha = 2.30$ ,  $\beta = 0.58$ , NSE = 0,88. RB-11 calibration resulted in  $\alpha = 0.02$ ,  $\beta = 0.97$ , NSE = 0.37. The calibration for the three basins combined resulted in  $\alpha = 5.00$ ,  $\beta = 0.51$ , NSE = 0.60. The validation from RB-01 resulted in NSE = 0.78, from RB-10 NSE = 0.87, and for RB-11 NSE = -0.64, and for the three basins combined NSE = 0.85. The analysis of the relative error, in relation to the validation events, between the results obtained using the original MUSLE coefficients ( $\alpha = 11.8$  and  $\beta = 0.56$ ) over the one obtained with the calibrated coefficients indicate an improvement of 2 to 1000 times, with the exception of 2 isolated events. Calibration evaluation indicates a high efficiency approximation, with NSE values ranging from good to acceptable for all basins, indicating significant relation between observed sediment production and the generated models. The obtained results indicate the calibrated MUSLE is capable of well-represent the events average, and that for smaller basins and in small-magnitude events, the approximation loses efficiency.

**Keywords:** Modified Universal Soil Loss Equation. MUSLE. Sediment production. Water erosion. Hydrographic basin. Rio dos Bugres.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio dos Bugres no contexto regional.	27
Figura 2: Localização da Bacia do Rio dos Bugres (RB-01) e as sub-bacias consideradas no estudo, sendo RB-11 uma sub-bacia da RB-10 que por sua vez é uma sub-bacia da RB-01. ....	28
Figura 3: Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica do Rio dos Bugres RB-01.....	29
Figura 4: Mapa pedológico da bacia hidrográfica do Rio dos Bugres RB-01.....	32
Figura 5: Mapa de uso do solo na bacia RB-01. Fonte: Adaptado de Censi, 2019.....	33
Figura 6: Mapa de uso do solo nas sub-bacias RB-10 e RB-11. Fonte: Adaptado de Censi, 2019 .....	34
Figura 7: Localização das estações de monitoramento.....	36
Figura 8: Mapa de declividades da bacia RB-01 conforme classificação EMBRAPA (2006).....	40
Figura 9: Mapa de declividades da bacia RB-10 e RB-11 conforme classificação EMBRAPA (2006).....	40
Figura 10: Mapa de declividades .....	41
Figura 11: Mapa de áreas acumuladas.....	42
Figura 12: Mapa da distribuição espacial dos tipos de solo da Bacia do Rio dos Bugres, fator K. Fonte: Adaptado de EPAGRI/CIRAM,2004 .....	46
Figura 13: Mapa do fator LS da MUSLE .....	47
Figura 14: Mapa distribuído do fator C, representado pela distribuição de uso do solo na bacia conforme critérios adotados. Fonte: Adaptado de Censi, 2019.....	48
Figura 15: Mapa distribuído do fator C, representado pela distribuição de uso do solo nas sub-bacias RB-10 e RB-11 conforme critérios adotados. Fonte: Adaptado de Censi, 2019 .....	48
Figura 16: Produção de sedimentos estimados pela MUSLE com os coeficientes originais e produção de sedimentos observados em campo para a bacia RB-01.....	52
Figura 17: Produção de sedimentos estimados pela MUSLE com os coeficientes originais e produção de sedimentos observados em campo para a bacia RB-10.....	52
Figura 18: Produção de sedimentos estimados pela MUSLE com os coeficientes originais e produção de sedimentos observados em campo para a bacia RB-11.....	53
Figura 19: Produção de sedimentos estimados pela MUSLE com os coeficientes originais e produção de sedimentos observados em campo para as três bacias. ....	53
Figura 20: Produção de sedimentos estimados pela MUSLE com os coeficientes originais e produção de sedimentos observados em campo para as três bacias. ....	54
Figura 21: Dispersão dos fatores ( $Q \times q_p$ ) e ( $Y/KLSCP$ ) na bacia RB-01 .....	56



Figura 22: Dispersão dos fatores (Q x qp) e (Y/KLSCP) na bacia RB-10 .....	56
Figura 23: Dispersão dos fatores (Q x qp) e (Y/KLSCP) na bacia RB-11 .....	57
Figura 24: Dispersão dos fatores (Q x qp) e (Y/KLSCP) no conjunto formado por todos eventos nas 3 bacias .....	57
Figura 25: Produção de sedimentos estimados pela MUSLE com os coeficientes calibrados para a bacia RB-01e produção de sedimentos observados em campo.....	58
Figura 26: Produção de sedimentos estimados pela MUSLE com os coeficientes calibrados e produção de sedimentos observados em campo na bacia RB-10.....	59
Figura 27: Produção de sedimentos estimados pela MUSLE com os coeficientes calibrados e produção de sedimentos observados em campo na bacia RB-11.....	60
Figura 28: Produção de sedimentos estimados pela MUSLE com os coeficientes calibrados para as três bacias e produção de sedimentos observados em campo no conjunto de todos eventos. ....	61
Figura 29: Comparação entre o erro percentual da relação produção de sedimentos MUSLE com os coeficientes calibrados e produção de sedimentos observados em campo, nos eventos individuais para as bacias analisadas individualmente e para as três em conjunto. ....	64
Figura 30: Produção de sedimentos estimados pela MUSLE calibrada na validação para a bacia RB-01e produção de sedimentos observados em campo.....	65
Figura 31: Produção de sedimentos estimados pela MUSLE calibrada na validação e produção de sedimentos observados em campo na bacia RB-10.....	65
Figura 32: Produção de sedimentos estimados pela MUSLE c calibrada na validação e produção de sedimentos observados em campo na bacia RB-11.....	66
Figura 33: Produção de sedimentos estimados pela MUSLE com os coeficientes da validação para as três bacias e produção de sedimentos observados em campo no conjunto de todos eventos. ....	66
Figura 34: Comparação entre o erro percentual da relação produção de sedimentos MUSLE com os coeficientes calibrados e MUSLE com os coeficientes não calibrados, nos eventos individuais para as bacias analisadas individualmente e para as três em conjunto. ....	69

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de solos e suas distribuições na bacia hidrográfica do Rio dos Bugres .....	31
Tabela 2: Eventos selecionados para calibração e validação do método para a bacia RB-01 .....	37
Tabela 3: Eventos selecionados para calibração e validação do método para a bacia RB-10 .....	37
Tabela 4: Eventos selecionados para calibração e validação do método para a bacia RB-11 .....	37
Tabela 5: Eventos selecionados para calibração e validação do método para todas bacias .....	37
Tabela 6: Valores de K para os tipos de solo da bacia hidrográfica do Rio dos Bugres .....	39
Tabela 7: Classificação do relevo da bacia de acordo com declividades .....	39
Tabela 8: Declividades e suas distribuições na bacia hidrográfica do Rio dos Bugres	39
Tabela 9: Tipos de uso do solo e suas distribuições na bacia hidrográfica do Rio dos Bugres .....	43
Tabela 10: Valores do fator C obtidos da literatura .....	43
Tabela 11: Constantes de recessão.....	44
Tabela 12: Valores médios dos fatores K, LS, C e P das bacias em estudo .....	49
Tabela 13: Constantes de recessão.....	49
Tabela 14: Vazões de pico em cada evento selecionado para a bacia RB-01, RB-10 e RB-11 .....	50
Tabela 15: Produção de sedimentos observada e produção de sedimentos específica. ....	51
Tabela 16: Erro percentual da produção de sedimentos esperada pela aplicação da MUSLE com os coeficientes originais em relação à observada em campo.....	53
Tabela 17: Coeficientes $\alpha$ e $\beta$ obtidos para cada bacia e para as bacias juntas.....	55
Tabela 18: Erro percentual da produção de sedimentos esperada pela aplicação da MUSLE com os coeficientes calibrados em relação à observada em campo, bacia RB-01. ....	58
Tabela 19: Erro percentual da produção de sedimentos esperada pela aplicação da MUSLE com os coeficientes calibrados em relação à observada em campo, bacia RB-10. ....	59
Tabela 20: Erro percentual da produção de sedimentos esperada pela aplicação da MUSLE com os coeficientes calibrados em relação à observada em campo, bacia RB-11. ....	60

Tabela 21: Erro percentual da produção de sedimentos esperada pela aplicação da MUSLE com os coeficientes calibrados em relação à observada em campo, para as três bacias. ....	61
Tabela 22: Comparação dos erros percentuais nos eventos individuais da calibração, em ordem crescente de proporção entre erros, em valores absolutos. ....	62
Tabela 23: Erro percentual da produção de sedimentos esperada pela aplicação da MUSLE com os coeficientes calibrados em relação à observada em campo, validação da bacia RB-01. ....	65
Tabela 24: Erro percentual da produção de sedimentos esperada pela aplicação da MUSLE com os coeficientes calibrados em relação à observada em campo, validação da bacia RB-10. ....	65
Tabela 25: Erro percentual da produção de sedimentos esperada pela aplicação da MUSLE com os coeficientes calibrados em relação à observada em campo, validação da bacia RB-11. ....	66
Tabela 26: Erro percentual da produção de sedimentos esperada pela aplicação da MUSLE com os coeficientes da validação em relação à observada em campo, para as três bacias. ....	67
Tabela 27: Comparação dos erros percentuais nos eventos individuais da validação, em ordem crescente de proporção entre erros, em valores absolutos. ....	68
Tabela 28: Produção de sedimentos observados em campo para a bacia RB-01 e simulados pela MUSLE com coeficientes originais. ....	70
Tabela 29: Produção de sedimentos observados em campo e simulados pela MUSLE com coeficientes calibrados para a RB-01. ....	70
Tabela 30: Produção de sedimentos observados em campo para a bacia RB-10 e simulados pela MUSLE com coeficientes originais. ....	70
Tabela 31: Produção de sedimentos observados em campo e simulados pela MUSLE com coeficientes calibrados para a bacia RB-10. ....	71
Tabela 32: Produção de sedimentos observados em campo para a bacia RB-11 e simulados pela MUSLE com coeficientes originais. ....	71
Tabela 33: Produção de sedimentos observados em campo e simulados pela MUSLE com coeficientes calibrados para a bacia RB-11. ....	71
Tabela 34: Produção de sedimentos observados em campo para as três bacias e simulados pela MUSLE com coeficientes originais. ....	72
Tabela 35: Produção de sedimentos observados em campo e simulados pela MUSLE com coeficientes calibrados para as três bacias. ....	72
Tabela 36: Fator de Nash-Sutcliffe obtidos para cada bacia e para as bacias juntas..	73

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
2.	OBJETIVOS.....	16
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1.	BACIA HIDROGRÁFICA.....	17
3.2.	PROCESSOS EROSIVOS.....	17
3.3.	PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS.....	18
3.4.	MODELAGEM MATEMÁTICA.....	19
3.4.1.	Modelos USLE e MUSLE.....	19
i.	Fator Erodibilidade do Solo - Fator k.....	21
ii.	Fator Topográfico - Fator LS.....	22
iii.	Fator Uso e Manejo do Solo - Fator C.....	22
iv.	Fator Práticas Conservacionistas - Fator P.....	23
v.	Fatores de Escoamento Superficial e Vazão de Pico.....	23
vi.	Coeficientes $\alpha$ e $\beta$ .....	23
3.5.	SEPARAÇÃO DE ESCOAMENTO.....	24
3.6.	COEFICIENTE DE NASH-SUTCLIFFE.....	26
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4.1.	ÁREA DE ESTUDO.....	27
4.1.1.	Geologia e geomorfologia.....	29
4.1.2.	Tipos de solo.....	30
4.1.3.	Uso e ocupação do solo.....	33
4.2.	DADOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS MONITORADOS.....	34
4.3.	IDENTIFICAÇÃO E SELEÇÃO DOS EVENTOS.....	36
4.4.	MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA.....	38
4.4.1.	Fator Erodibilidade do Solo (K).....	38
4.4.2.	Fator Topográfico (LS).....	39
4.4.3.	Fator Uso e Manejo do Solo (C).....	43

4.4.4.	Fator Práticas Conservacionistas (P).....	43
4.4.5.	Fator de Escoamento Superficial e Vazão de Pico (Q e qp) .....	44
4.4.6.	Coeficientes $\alpha$ e $\beta$ da MUSLE.....	45
4.4.7.	Calibração e Validação da MUSLE.....	45
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
5.1.	Fatores MUSLE .....	46
5.2.	Análise do Comportamento Hidrossedimentológico.....	50
5.3.1.	Equação MUSLE Original.....	52
5.3.2.	Calibração e Validação dos Parâmetros $\alpha$ e $\beta$ .....	55
5.3.3.	Equação MUSLE Calibrada.....	57
5.3.4.	Equação MUSLE Validada .....	64
5.3.5.	Coeficiente de Nash-Sutcliffe.....	69
5.3.6.	Fator de escala.....	74
6.	CONCLUSÃO .....	76
	REFERÊNCIAS .....	77
	Apêndice I - Hidrossedimentogramas para cada bacia durante a série de dados .....	84
	Apêndice II - Hidrogramas e separação do escoamento para cada bacia durante a série de dados .....	90

## 1. INTRODUÇÃO

A erosão do solo é um processo natural de evolução da paisagem, que provoca mudanças na dinâmica de rios e córregos devido ao acúmulo de sedimentos, reduzindo a capacidade de armazenamento e transporte dos mesmos (Sadeghi *et al.*, 2014).

O escoamento superficial é o elemento do ciclo hídrico diretamente associado à erosão, pois promove a desagregação de partículas do solo e o seu transporte, até a deposição que, dependendo do volume transportado e da velocidade, pode ocorrer em corpos d'água (Avanzi *et al.*, 2008).

O desequilíbrio no aporte de sedimentos finos nos cursos d'água eleva a turbidez e compromete a qualidade da água dos rios. Em mananciais de abastecimento, atrapalha o processo de tratamento, elevando o tempo e os custos associados (Grando, 2008). Devido ao uso futuro previsto para a bacia em estudo, como fonte de abastecimento de água para o município de Rio Negrinho, foi instituída a APA - Área de Proteção Ambiental do Rio dos Bugres, como forma restringir uso e ocupação do solo e de assegurar a preservação ambiental na área (Cardoso, 2014).

Devido à escassez de dados medidos em campo e à dificuldade em mensurar os fenômenos hidrossedimentológicos, são empregados modelos matemáticos associados às características das bacias hidrográficas para a estimativa de produção de sedimentos. Os modelos são ferramentas muito utilizadas, tanto em planejamento preventivo e conservacionista quanto para o monitoramento e controle (James & Burges, 1982).

Considerando que a erosão depende de fatores locais, é importante associar as características locais da bacia na estrutura do modelo para que a modelagem seja representativa. Para que o modelo gerado seja validado, é necessária a comparação entre os resultados obtidos na simulação e os resultados obtidos através de medições em campo.

A modelagem matemática torna possível a simulação de eventos futuros e eventos não monitorados em campo, otimizando o tempo e recursos investidos em estudos, gerando resultados de forma eficiente quando devidamente calibrada e validada. O monitoramento tradicional demanda tempo, deslocamento de pessoal e equipamentos, e tem custos operacionais

regulares, enquanto que os modelos, uma vez calibrados e validados, não exigem frequência amostral elevada. Cabe salientar que a modelagem é uma ferramenta auxiliar à gestão, e que só o monitoramento permanente retorna dados reais que indicam a situação real do ambiente natural, através dos dados medidos em campo, que sempre serão mais confiáveis que os dados estimados através de modelos.

O modelo de produção de sedimentos da MUSLE é aplicado em todo o mundo. Em uma revisão de 49 estudos que utilizaram a MUSLE (Sadeghi *et al*, 2014), foi observado que quando aplicada sob condições semelhantes à de sua criação, ou quando calibrada de acordo com as características específicas da bacia em estudo, o modelo é capaz de fornecer estimativas razoáveis. A modelagem consiste na calibração dos coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  a partir de dados de monitoramento hidrossedimentológico e avaliação local dos parâmetros relacionados à erodibilidade, uso do solo, declividade, e práticas conservacionistas (Sadeghi *et al*, 2014).

A associação da MUSLE a Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) torna possível a espacialização das características da bacia aos modelos gerados, agregando assim maior confiabilidade aos resultados.

O presente estudo busca associar dados locais da bacia hidrográfica do rio dos Bugres ao modelo matemático MUSLE, calibrando seus fatores em função das características da bacia.

## **2. OBJETIVOS**

Calibrar e validar a Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE) para estimativas de produção de sedimentos em eventos de chuva na bacia hidrográfica do Rio dos Bugres em Santa Catarina.



### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. BACIA HIDROGRÁFICA

Bacia hidrográfica tem relação com a existência de divisores d'água, regiões de cabeceiras e nascentes, representando a área de drenagem de um curso hídrico e seus afluentes.

A bacia pode ter seus limites encontrados a partir das características topográficas do terreno, que indicam os caminhos preferenciais do escoamento superficial. Pereira (2014) caracteriza a bacia de drenagem como uma área da superfície que drena a água, os sedimentos e os materiais dissolvidos para uma saída comum, o exutório, ponto mais baixo de uma bacia, o ponto de interesse de estudo, onde pretende-se instalar redes de monitoramento para avaliação de parâmetros, por exemplo, vazão e concentração de sólidos suspensos. Toda área acima de um ponto exutório é a área de contribuição da bacia em análise. Uma bacia hidrográfica tem embutida em si diversas sub-bacias, de forma que todo escoamento no exutório da sub-bacia vai eventualmente atingir e fazer parte do exutório da bacia maior. Segundo Schiavetti *et al* (2002) uma bacia hidrográfica é a escala adequada para estudos hidrossedimentológicos.

A bacia hidrográfica do rio dos Bugres, área de estudo deste trabalho, está localizada no município de Rio dos Bugres e tem sido objeto de estudo de diversas linhas de pesquisa (Ühlbauer, 2017; Vardanegra, 2008; Grando *et al.*, 2008; Kobiyama *et al.*, 2010; Giglio & Kobiyama, 2011; Batistel *et al* 2017; Cardoso *et al.*, 2012). Sendo, inclusive, algumas pesquisas na área de sedimentos (Cardoso, 2014; Censi, 2019, Lopes, 2008; Lino, 2009; Malutta, 2012).

#### 3.2. PROCESSOS EROSIVOS

A erosão do solo é um processo natural que acontece continuamente sobre a superfície terrestre. O desencadeamento dos processos depende de vários fatores, como propriedades de infiltração do solo e cinéticas da água, resistência do solo à erosão, características topográficas, cobertura vegetal e uso e manejo do solo. Os processos erosivos podem ser intensificados por atividades humanas, como a pecuária, a agricultura e a urbanização.

A perda de solo causa impactos e degradação ambiental, como redução da qualidade da água pela presença de sedimentos e suas associações com agrotóxicos e nutrientes, afetando a fauna, a flora e o meio antrópico (Grando, 2008).

A erosão hídrica é diferenciada de acordo com a forma de manifestação na superfície do terreno, diferenciada em laminar, entressulcos, ravinas e voçorocas (Pereira, 2014). Erosão do tipo laminar é originada quando a energia do escoamento superficial supera as forças de coesão natural das partículas do solo e ocorre de forma difusa, sem o desenvolvimento de fluxos preferenciais. Intensos processos de escoamento pluvial, provocam o arrasto do horizonte superficial dos solos, podendo haver a formação de sulcos, ravinas e voçorocas. A erosão em ravinas é caracterizada pela formação de canais pequenos e bem definidos na superfície do solo, com ocorrência de escoamento na forma de fluxo concentrado. Voçorocas são um estágio avançado da erosão em sulcos, quando a incisão no solo atinge o lençol freático (Guerra, 2008). A formação de voçorocas também ocorre pelo escoamento subsuperficial, que transporta água e sedimentos por dutos subterrâneos. O aumento da precipitação aumenta a vazão e alargamento desses canais subterrâneos, provocando o colapso do material superficial, gerando as voçorocas. Mesmo a erosão do tipo laminar, pode ocasionar perdas de solo significativas em apenas um evento pluviométrico (Pereira, 2014).

### 3.3. PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

Produção de sedimentos é o termo utilizado para descrever a quantidade de sedimentos que passa pelo exutório de uma bacia hidrográfica. Nem todo sedimento erodido na bacia hidrográfica alcança o exutório, apenas uma pequena parte contribui efetivamente para a produção de sedimentos. Pode ocorrer dentro da área da bacia, na vertente, em vales, na planície de inundação ou no próprio canal a deposição e armazenamento dos sedimentos. Quando a deposição de partículas ocorre dentro da própria bacia em que foram geradas, essas partículas não contribuem para a produção de sedimentos (Censi, 2019).

A desagregação, transporte e deposição dos sedimentos é responsável por uma série de impactos ao meio ambiente. Principalmente durante eventos

de chuvas, os sedimentos gerados, dependendo do volume transportado e da velocidade do escoamento superficial, chegam aos corpos d'água e são transportados em suspensão nos rios (Cardoso, 2013).

O excesso de turbidez, relacionado ao desequilíbrio no aporte de sedimentos finos nos cursos d'água, relaciona-se intimamente com o comprometimento da qualidade da água dos rios. Conforme Grandó (2008), a carga em suspensão é constituída de sedimentos finos, partículas de silte e argila, suspensas na água até a velocidade do fluxo diminuir a um limite mínimo, quando depositam-se ao longo do rio.

Em mananciais de abastecimento de água, o excesso de turbidez atrapalha o processo de tratamento, elevando o tempo e os custos do tratamento (Grandó, 2008).

### 3.4. MODELAGEM MATEMÁTICA

A alta perda de solos no Brasil evidencia a necessidade de desenvolvimento de pesquisas voltadas ao tema. Nesse contexto, a modelagem matemática tem se mostrado eficaz na avaliação qualitativa e quantitativa de perdas de solos, apresentando relevância na modelagem de áreas agrícolas e de áreas com reservatórios para exploração hídrica (Pereira, 2014).

#### 3.4.1. Modelos USLE e MUSLE

O estudo do fenômeno da erosão é realizado com a utilização de métodos diretos, com base em materiais erodidos coletados, em experimentação a campo ou laboratório, além de métodos indiretos através de modelagem matemática. A Equação Universal de Perda de Solo (USLE) é um modelo matemático proposto por Wischmeier & Smith (1965), que através de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), possibilita a estimativa da perda de solo por erosão laminar relacionada ao tipo de uso e ocupação da terra. No entanto, a USLE possui a limitação de não prever a deposição e não incluir a produção de sedimentos por ravina, erosão das margens e fundo de canal, além de não ser recomendada para o estudo de eventos específicos (BELLINASSO, 2015).

A modificação da USLE foi desenvolvida por Williams (1975) – Equação Universal de Perdas de Solo Modificada (MUSLE) – visando a previsão da produção de sedimentos em pequenas e médias bacias hidrográficas, através da análise de chuvas individuais.

Na MUSLE, o aporte de sedimentos no exutório de uma bacia hidrográfica em um evento de chuva é dado pela seguinte equação (WILLIAMS, 1975):

$$Y = \alpha(Q * q_p)^\beta * K * L * S * C * P$$

(Equação 1)

onde:

- Y é a produção de sedimentos em determinado evento (unidade: t);
- $\alpha$  e  $\beta$  são coeficientes de ajuste do modelo (adimensionais);
- Q é o volume de escoamento superficial do evento ( $m^3$ );
- $q_p$  é a vazão de pico do evento ( $m^3 s^{-1}$ );
- K é a erodibilidade média dos solos da bacia (t h MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>);
- LS é fator de comprimento de rampa e declividade das vertentes da bacia (adimensional);
- C é o fator médio de uso e manejo do solo da bacia (adimensional); e
- P é o fator de práticas conservacionistas (adimensional).

Para tornar os resultados calculados pelo método aceitáveis, são efetuados processos de calibração e validação com dados observados em campo. Na MUSLE original, os coeficientes da equação 1 são  $a = 11,8$  e  $b = 0,56$  (Williams, 1975). Os fatores K, LS, C e P são obtidos de tabelas e de dados topográficos da bacia de interesse, e Q e  $q_p$  são estimados a partir de dados hidrossedimentológicos.

Os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  da MUSLE são ajustados conforme os valores de produção de sedimentos calculados pelo modelo e pela produção de sedimentos observada. Caso estejam inadequados às condições fisiográficas e hidrológicas locais das bacias em estudo, podem levar à super ou subestimativa da produção de sedimentos, reduzindo a capacidade de predição do modelo quanto ao comportamento sedimentológico das bacias estudadas.

A equação da MUSLE é baseada na USLE, e uma das principais variações é o fator temporal. Na USLE, a estimativa da distribuição espacial de

sedimentos numa bacia é anual e na MUSLE, é por evento de chuva. Outra modificação, diz respeito ao fator erosividade da chuva, substituído na MUSLE por um fator de escoamento superficial que considera vazão de pico e volume total do escoamento, envolvidos em um evento e relacionados a uma bacia em específico pelos coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$ . Em função do novo conceito de análise temporal, a escala espacial também é influenciada. Os parâmetros vazão de pico e volume total de chuva, são estimados para a bacia. O fator LS deve ser espacializado e distribuído para a área da bacia, visto que na USLE, esses valores são obtidos a partir da parcela padrão (Mallmann, 2019).

A espacialização dos fatores da MUSLE pixel a pixel, pode ser feita em ambiente SIG, o que garante resultados com maior facilidade e agilidade no processamento dos valores médios necessários para aplicação do método.

#### i. Fator Erodibilidade do Solo - Fator k

O fator k de erodibilidade, representa a suscetibilidade à erosão, ou a falta de capacidade de resistência aos processos erosivos de um determinado tipo de solo (Wischmeier & Smith, 1978). Representa a resistência do solo ao desprendimento e transporte de partículas. A resistência dos solos à erosão é influenciada pela topografia, pelas propriedades do solo e pelo manejo. Os valores da erodibilidade variam de acordo com a textura do solo, estabilidade de agregados, resistência ao cisalhamento, capacidade de infiltração e teor de matéria orgânica (Guerra, 2008).

A erodibilidade do solo pode ser medida de forma direta ou indireta. O método direto original envolve medidas no campo, sob chuva natural, por longos períodos (Wischmeier & Smith, 1965) e possui custos elevados associados. É possível adequar o método e acelerar os experimentos com o uso de simuladores de chuva. O método indireto de obtenção da erodibilidade do solo se dá pela aplicação de equações ou modelos que utilizam atributos simples do solo (morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos) como variáveis independentes, para predição do fator K (Silva, 2016). O método indireto mais conhecido para estimativa do fator K é o nomograma proposto por Wischmeier *et al.* (1971), concebido considerando predominantemente solos de textura média do meio-oeste dos EUA. Adaptações do método nomográfico e outros métodos indiretos para determinação da erodibilidade têm sido

desenvolvidas e testadas para solos brasileiros por diferentes autores (Silva, 2016).

#### ii. Fator Topográfico - Fator LS

O fator LS representa o resultado combinado entre o comprimento de rampa e o grau de declividade. Apesar de serem calculados separadamente, na prática, representam um único fator topográfico. Foi definido na proposição da USLE como a taxa de perda de solo por unidade de área de uma parcela padrão de 22,13 m de comprimento e 9% de declive (Wischmeier & Smith, 1978). Segundo Lombardi Neto (1992), a perda de solos tende a crescer com o aumento da declividade e do comprimento das vertentes, influenciando o volume e a velocidade de escoamento na superfície. Conforme Fornelos & Silva (2006), o comprimento de rampa representa a distância entre o ponto de origem do escoamento superficial e o ponto onde a declividade diminui o suficiente para que haja a deposição de sedimentos. De acordo com a literatura, o fator LS pode ser determinado por métodos manuais ou digitais. O uso dos SIG's subsidia estudos relacionados a esse fator, devido as facilidades na manipulação das informações (Pereira, 2014).

Conforme Mallmann *et al.* (2019) existem diferentes métodos de cálculo do fator LS, entre eles o Método do Comprimento Equivalente, o Método Moore e Burch (1986) e o método utilizado pelo modelo SWAT - Soil and Water Assessment Tool.

#### iii. Fator Uso e Manejo do Solo - Fator C

Segundo Guerra (2008), a cobertura vegetal é capaz de conferir maior rugosidade aos solos, dissipando energia proveniente das gotas da chuva e reduzindo a velocidade do escoamento superficial. A proteção da cobertura vegetal depende do tipo de vegetação, do estágio de desenvolvimento e das estações do ano (Pereira, 2014). O fator C é definido pela relação de perda de solo entre o solo com a proteção da cobertura vegetal e o solo exposto.

#### iv. Fator Práticas Conservacionistas - Fator P

O fator P está relacionado às práticas conservacionistas contra erosão utilizadas numa área, sendo as mais comuns o plantio em contorno, plantio em faixas de contorno, terraceamento e alternância em campinas (Pereira, 2014).

#### v. Fatores de Escoamento Superficial e Vazão de Pico

Na MUSLE, o fator de cinética da chuva (fator R da USLE) é substituído pelo um fator de escoamento superficial que considera vazão de pico e volume total do escoamento. Volume total de escoamento representa a vazão superficial na área da bacia, e a vazão de pico é a máxima vazão em um evento de chuva, são indicadores da intensidade da erosão e são utilizadas para estimar a produção de sedimentos.

#### vi. Coeficientes $\alpha$ e $\beta$

Na MUSLE, os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  representam as características específicas das bacias. Para as áreas onde a equação foi desenvolvida, os coeficientes são  $\alpha$  de 11,8 e  $\beta$  de 0,56, para o sistema métrico de unidades. Como o modelo foi desenvolvido para condições específicas, a sua aplicação sem calibração dos coeficientes resulta em erros consideráveis (Sadeghi *et al*, 2014).

Segundo Silva *et al.* (2011), os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  da MUSLE podem variar em função das condições fisiográficas e hidrológicas das bacias, uma vez que a relação de aporte de sedimento, que é a razão entre o aporte de sedimento e a erosão total na bacia, é muito variável.

Os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  são os fatores que mais influenciam na resposta do modelo MUSLE, contribuindo com cerca de 66% da variabilidade da produção de sedimentos, segundo estudos de Odongo *et al.* (2013).

Avanzi *et al.* (2008) obtiveram valores de 14,96 e 0,59 para os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  da MUSLE, respectivamente, para uma pequena bacia de 2,9 km<sup>2</sup> nos tabuleiros costeiros do Espírito Santo. No estudo de Silva *et al.* (2011), desenvolvido na bacia do Ribeirão Pipiripau de 235 km<sup>2</sup> no Distrito Federal, obtiveram valores de 3,19 e 0,56 para os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  da MUSLE.

### 3.5. SEPARAÇÃO DE ESCOAMENTO

O escoamento superficial tem início quando a taxa de infiltração de uma chuva intensa supera a taxa de infiltração do solo. A água se desloca pelas vertentes da bacia hidrográfica em direção aos cursos d'água, podendo transportar sedimentos e compostos químicos. Durante o período sem chuva, a vazão do rio é mantida pelo escoamento de base, oriundo do reservatório de água subterrânea, abastecido durante os períodos chuvosos (Collischonn e Tassi, 2008).

De acordo com Collischonn & Tassi (2008), o escoamento ou vazão total representada no hidrograma, resulta da soma algébrica dos escoamentos superficial e de base (Equação 1).

$$y_i = f_i + b_i$$

(Equação 1)

onde:  $y_i$  é o escoamento total,  $f_i$  é o escoamento superficial,  $b_i$  é o escoamento subterrâneo e  $i$  é o intervalo do registro de dados.

A equação do escoamento subterrâneo pode ser expressa de acordo com a Equação 2, é resultado da hipótese de que o escoamento básico em direção ao canal segue o princípio do reservatório linear, cuja função de esvaziamento segue uma função do tipo exponencial. Dessa forma, o reservatório subterrâneo sofre esvaziamento conforme o fluxo da água segue na direção do canal. Havendo recarga deste reservatório por meio das chuvas, há seu reabastecimento. No período em que não ocorre a recarga, seu esvaziamento é contínuo no tempo, originando a curva de recessão.

$$b_{i+1} = b_i * e^{\frac{-\Delta t}{k}}$$

(Equação 2)

onde:,  $b_{i+1}$  é o escoamento subterrâneo no instante  $i+1$ ,  $b_i$  é o escoamento subterrâneo no instante  $i$ ,  $\Delta t$  é o intervalo de tempo entre os instantes  $i$  e  $i+1$  e  $k$  é a constante de recessão.

A mesma equação pode ser expressa pela Equação 3.

$$b_{i+1} = b_i * a$$

(Equação 3)

onde:  $a$  pode ser expressa pela Equação 4.



$$a = e^{\frac{-\Delta t}{k}}$$

(Equação 4)

A constante de recessão  $k$  é calculada pela Equação 5.

$$k = \frac{-\Delta t}{\ln \frac{Q_{t+\Delta t}}{Q_t}}$$

(Equação 5)

onde:  $\Delta t$  é o tempo de recessão,  $Q_{t+\Delta t}$  é a última vazão da recessão e  $Q_t$  é a primeira vazão da recessão.

A determinação da constante de recessão  $k$  deve ser realizada em períodos longos de recessão registrados na série histórica, considerando os períodos entre picos de vazão e valores mínimos nos eventos na série de dados e a média aritmética simples dos valores de  $k$  obtidos.

A separação da vazão de base da vazão total pode ser feita com uso de várias metodologias, uma delas utilizando o filtro numérico de Eckhardt (2005).

O filtro de Eckhardt (2005) utiliza os mesmos parâmetros definidos por Collischonn e Tassi (2008), mais um coeficiente para ajuste da equação (BFI<sub>max</sub>) de acordo com as características da bacia hidrográfica.

$$b_i = \frac{(1 - BFI_{max}) * a * b_{i-1} + (1 - a) * BFI_{max} * y_i}{1 - a * BFI_{max}}$$

(Equação 6)

onde:  $b_i$  é o escoamento subterrâneo no instante  $i$ ,  $b_{i-1}$  é o escoamento subterrâneo no instante  $i-1$ ,  $y_i$  é o escoamento total no instante  $i$ ,  $a$  está definida na equação 4 e  $BFI_{max}$  é o índice de fluxo de base máximo (adimensional).

O parâmetro da  $BFI_{max}$  da equação deve ser calibrado, pois varia para diferentes bacias hidrográficas, conforme características fisiográficas e uso e ocupação do solo, por exemplo. Quanto mais próximo de 1, maior a permeabilidade do solo (Fagundes, 2014).

O escoamento superficial tem relação com a concentração de sedimentos na água dos corpos hídricos através dos processos de erosão do solo, e o escoamento de base é o que mantém as vazões em períodos sem chuva. Conhecer a relação entre escoamento superficial e turbidez subsidia

projetos de obras hidráulicas como barragens e reservatórios para abastecimento de água e geração de energia elétrica (Fagundes, 2014).

### 3.6. COEFICIENTE DE NASH-SUTCLIFFE

Para proceder à avaliação do modelo gerado na calibração e na validação, em relação à produção de sedimentos obtido nas medições em campo, foi calculado o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970), dado pela equação 7:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_1^t (Y_{calibrado} - Y_{medido})^2}{\sum_1^t (Y_{medido} - Y_{médio})^2} \quad (\text{Equação 7})$$

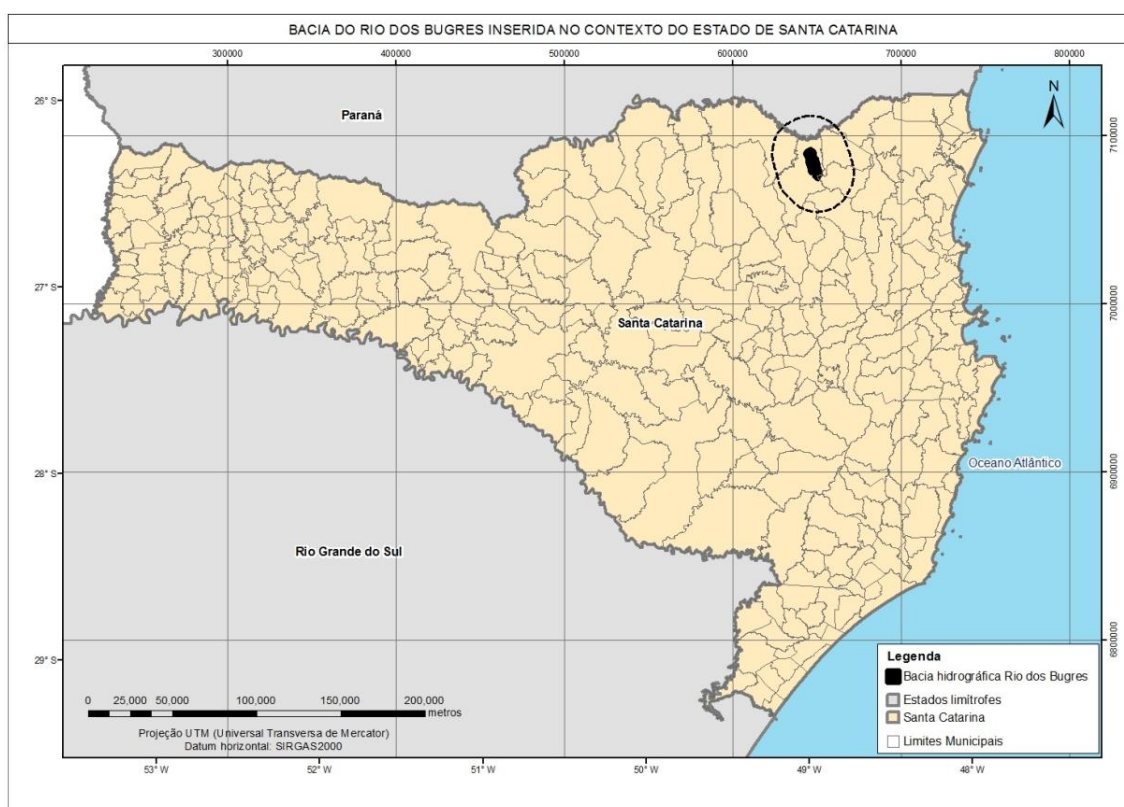
Onde: NSE = coeficiente de Nash-Sutcliffe;  $Y_{calibrado}$  é a produção de sedimentos calculada com os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  ajustados,  $Y_{medido}$  é a produção de sedimentos observada no evento e  $Y_{médio}$  é a média de  $Y_{medido}$  em todo o período de simulação  $t$ .

O coeficiente de Nash é um dos critérios estatísticos mais utilizados na avaliação da precisão de modelos hidrológicos. O coeficiente NSE varia de  $-\infty$  a 1, onde a aproximação de 1 caracteriza melhor ajuste entre dados calculados pelo modelo e observados em campo. O coeficiente de Nash-Sutcliffe quando igual a zero, indica que o desempenho do modelo calibrado é equivalente ao desempenho da média da série, calculados pela soma do erro quadrático. O desempenho de um modelo matemático é considerado adequado e bom se o valor de NSE superar 0,75, e é considerado aceitável se o valor de NSE estiver entre 0,36 a 0,75 (Collischonn, 2001).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido para a Bacia Hidrográfica do Rio dos Bugres, localizada no município de Rio Negrinho, no norte do estado de Santa Catarina, entre as coordenadas 26° 17' 00" e 26° 26' 30"S e 49° 28' 30" e 49° 34' 00" W de Greenwich.

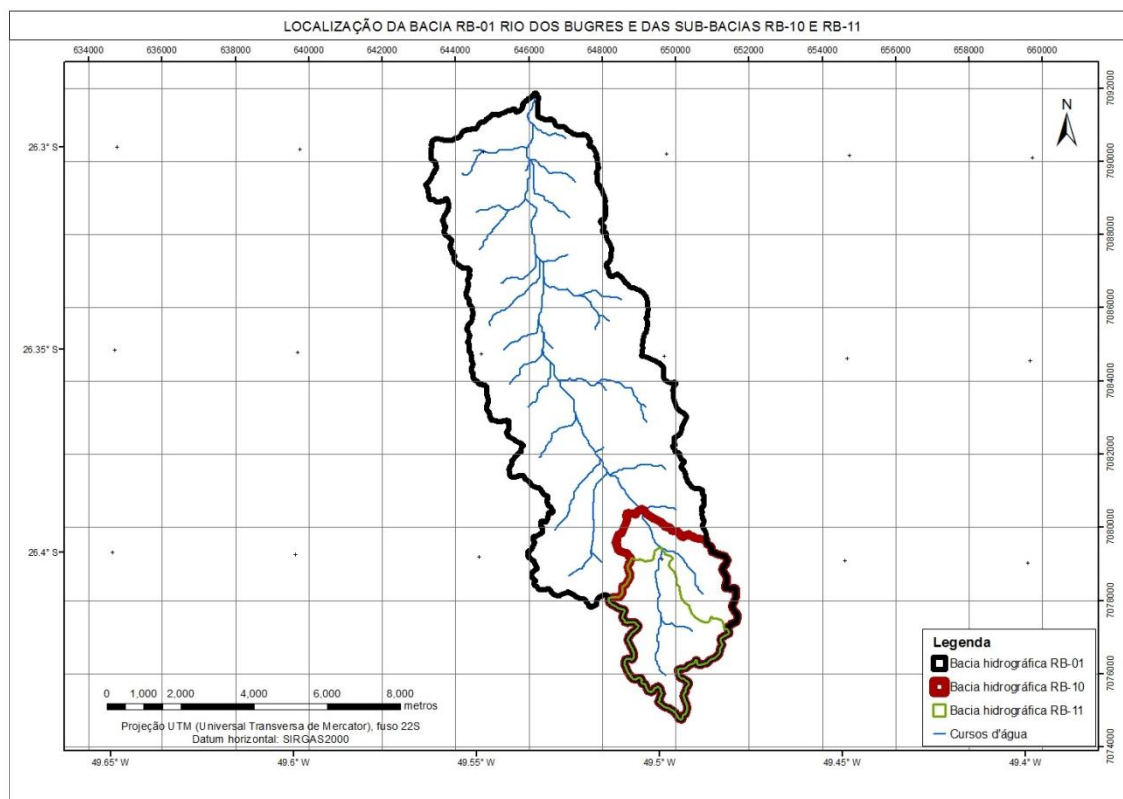


**Figura 1:** Localização da Bacia Hidrográfica do Rio dos Bugres no contexto regional.  
Fonte: Adaptado de IBGE/Portal de Mapas.

Inserida na Bacia do Rio dos Bugres (RB-01), encontra-se a sub-bacia RB-10, que por sua vez tem como sub-bacia a RB-11, conforme observado na Figura 2. A bacia hidrográfica do Rio dos Bugres possui área de 66,41 km<sup>2</sup> e cotas entre 787 m e 981 m. A bacia RB-10 possui área de 11,45 km<sup>2</sup> e a RB-11 6,97 km<sup>2</sup>.

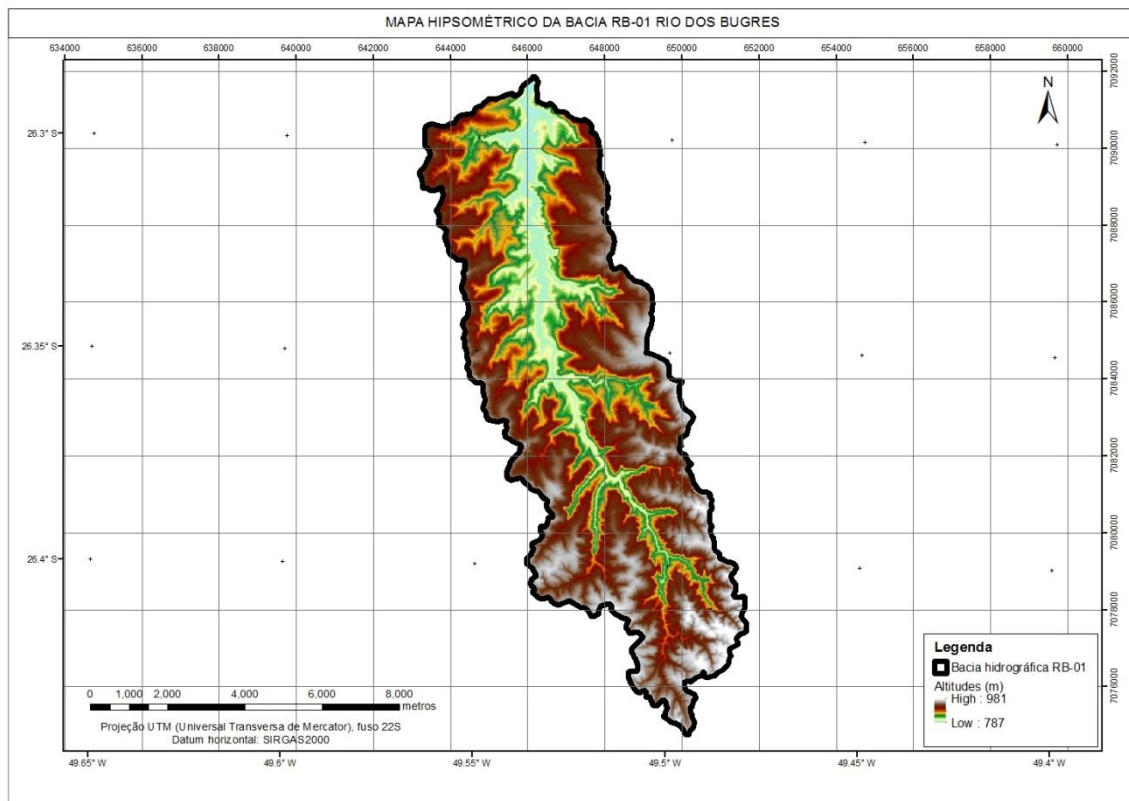
As bacias foram instrumentalizadas para entender as influências hidrológicas dos diferentes usos do solo na região, caracterizada pelo

reflorestamento de *Pinus* e pela Floresta Ombrófila Mista (Kobiyama et al. 2007). O monitoramento hidrossedimentológico foi realizado por Grison (2013) e Cardoso (2014).



**Figura 2:** Localização da Bacia do Rio dos Bugres (RB-01) e as sub-bacias consideradas no estudo, sendo RB-11 uma sub-bacia da RB-10 que por sua vez é uma sub-bacia da RB-01.

A caracterização altimétrica da bacia foi obtida com o uso do software ArcGis, tendo como base o Levantamento Aerofotogramétrico 2010 - Modelo Digital de Terreno com resolução espacial de 1 metro disponível no portal SIGSC do governo do Estado de Santa Catarina (SIGSC, 2010). Foi elaborado um mosaico das 9 imagens que compõe a bacia nessa resolução, e recorte para a área da bacia do Rio dos Bugres, que resultou na Figura 3, onde observa-se uma alta amplitude altimétrica, sendo as maiores altitudes localizadas na região sul/sudeste, em regiões de cabeceira da bacia.



**Figura 3:** Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica do Rio dos Bugres RB-01.

O clima da região é Cfb, segundo a classificação de Köppen, do tipo temperado constantemente úmido, com verão fresco, sem estação seca definida; a temperatura média anual varia entre 15,5°C a 17°C, com precipitação média anual entre 1360 e 1670 mm (Vardanega, 2008).

#### 4.1.1. Geologia e geomorfologia

A região da bacia do Rio dos Bugres encontra-se inserida no contexto de rochas sedimentares do Grupo Itararé do Super-Grupo Tubarão (Bortoluzzi, 1987). Esta unidade é resultante da deposição de espessas camadas de sedimentos predominantemente finos, derivados de rochas em ambiente glacial e periglacial, desde os tempos do Período Carbonífero (há aproximadamente 340 milhões de anos) até o início do Período Mesozóico (há cerca de 230 milhões de anos). Os sedimentos formaram camadas ou extratos de siltitos, folhelhos, argilitos, arenitos, arcóseos e conglomerados, com intercalações de lentes e camadas de calcário e carvão (Grisson, 2013). A

geologia da bacia do Rio dos Bugres é bastante variada, com predominância de arenito e de folhelho (Grison, 2013).

A bacia faz parte da Unidade Geomorfológica Patamar de Mafra, de superfície bastante regular, composta predominantemente por relevo de colinas modelado por erosão constante e homogênea em praticamente toda a bacia (Grison *et al.*, 2014). O relevo na bacia varia de suave ondulado a fortemente ondulado.

Segundo Censi (2019) a bacia hidrográfica RB01 está enquadrada dentro da unidade geológico-ambiental DSVMPasaf, caracterizada por intercalações de sedimentos arenosos, siltico-argilosos e folhelhos, com relevo caracterizado por colinas amplas e suaves. Os aquíferos possuem baixa potencialidade, apresentando águas duras. Os taludes desestabilizam-se com facilidade e são bastante suscetíveis à erosão. Em relevos mais acidentados é elevada a suscetibilidade à movimentos de massa, inclusive queda de blocos de rocha.

#### 4.1.2. Tipos de solo

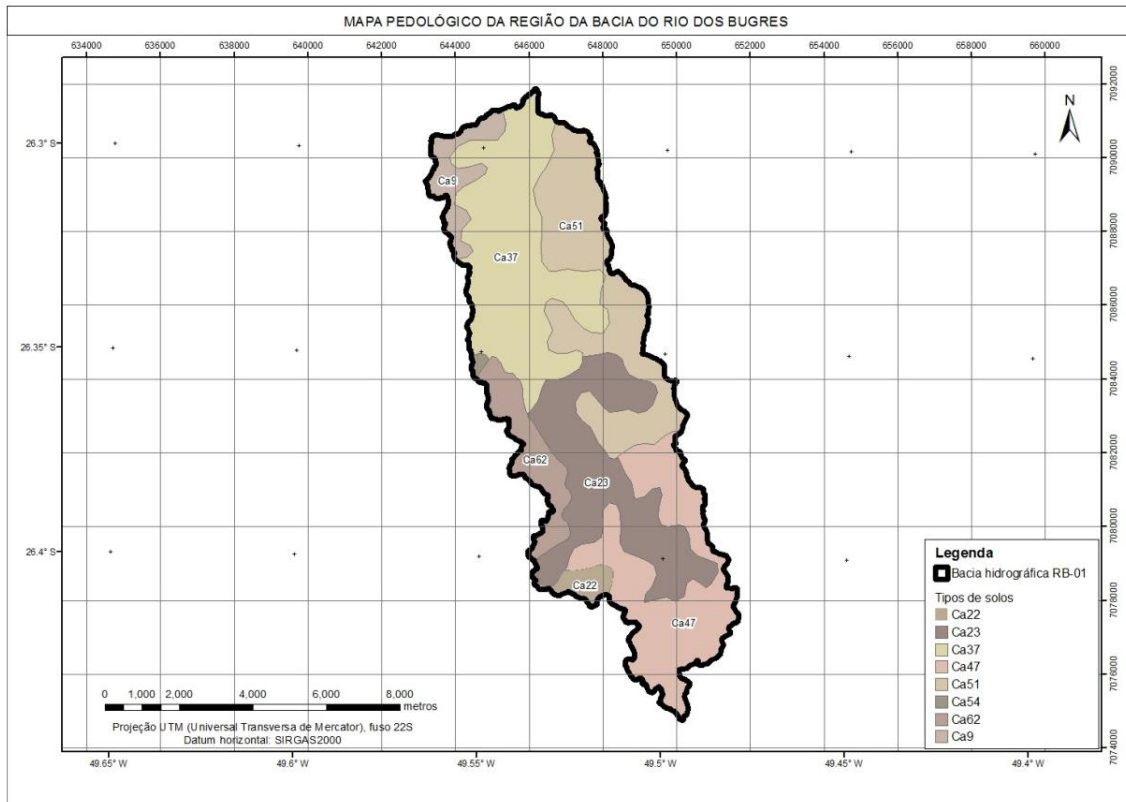
Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018), os solos que predominam na região em estudo são os da ordem Cambissolos, solos minerais, não hidromórficos com horizonte B incipiente, solos que possuem horizonte subsuperficial com baixa alteração física e química, com alteração de cor e estrutura (Grison, 2014).

O mapa pedológico da bacia foi confeccionado com base no mapa de solos de Santa Catarina, elaborado pelo Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina EPAGRI/CIRAM em 2004 em escala 1:250.000 (EMBRAPA, 2004), que originalmente apresenta a distribuição espacial dos solos do estado com nomenclatura anterior ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS).

Nesse contexto, conforme levantamento e descrição de EMBRAPA (2004), as unidades existentes estão listadas na tabela abaixo, com a respectiva análise da área de ocupação na bacia em estudo.

**Tabela 1:** Tipos de solos e suas distribuições na bacia hidrográfica do Rio dos Bugres

<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>	<b>% na bacia RB-01</b>	<b>% na bacia RB-10</b>	<b>% na bacia RB-11</b>
<b>Ca22</b>	Associação Cambissolo Álico Tb A moderado, textura argilosa + Podzólico Bruno-Acinzentado Álico A moderado, textura média/argilosa, ambos fase floresta subtropical perenifólia, relevo suave ondulado e ondulado.	13,56	-	-
<b>Ca23</b>	Associação Cambissolo Álico Tb A moderado, textura argilosa + Podzólico Bruno-Acinzentado Álico A moderado, textura média/argilosa, ambos fase floresta subtropical perenifólia, relevo ondulado e forte ondulado.	3,94	29,76	12,37
<b>Ca9</b>	Cambissolo Álico Tb A moderado, textura argilosa, fase floresta subtropical perenifólia, relevo suave ondulado e ondulado.	55,96	-	-
<b>Ca37</b>	Cambissolo Álico Tb A moderado e proeminente, textura média, fase floresta e campo subtropical, relevo ondulado e forte ondulado.	14,18	-	-
<b>Ca47</b>	Cambissolo Álico Tb A proeminente, textura argilosa, fase floresta subtropical perenifólia, relevo forte ondulado.	3,59	70,24	87,63
<b>Ca51</b>	Associação Cambissolo Álico Tb A proeminente, textura argilosa, relevo ondulado + Solos Litólicos Álicos A proeminente, textura média, relevo forte ondulado (substrato sedimentos pelíticos), ambos fase floresta subtropical perenifólia.	2,83	-	-
<b>Ca54</b>	Associação Cambissolo Álico Tb A proeminente, textura média, relevo ondulado e forte ondulado + Cambissolo Álico latossólico A proeminente, textura média, relevo suave ondulado, ambos fase floresta subtropical perenifólia.	2,41	-	-
<b>Ca62</b>	Associação Cambissolo Álico Tb A húmico, textura muito argilosa, relevo ondulado + Solos Litólicos Álicos A húmico, textura média, relevo forte ondulado (substrato sedimentos pelíticos), ambos fase floresta e campo subtropical.	3,54	-	-



**Figura 4:** Mapa pedológico da bacia hidrográfica do Rio dos Bugres RB-01  
 Fonte: Adaptado de EMBRAPA, 2004.

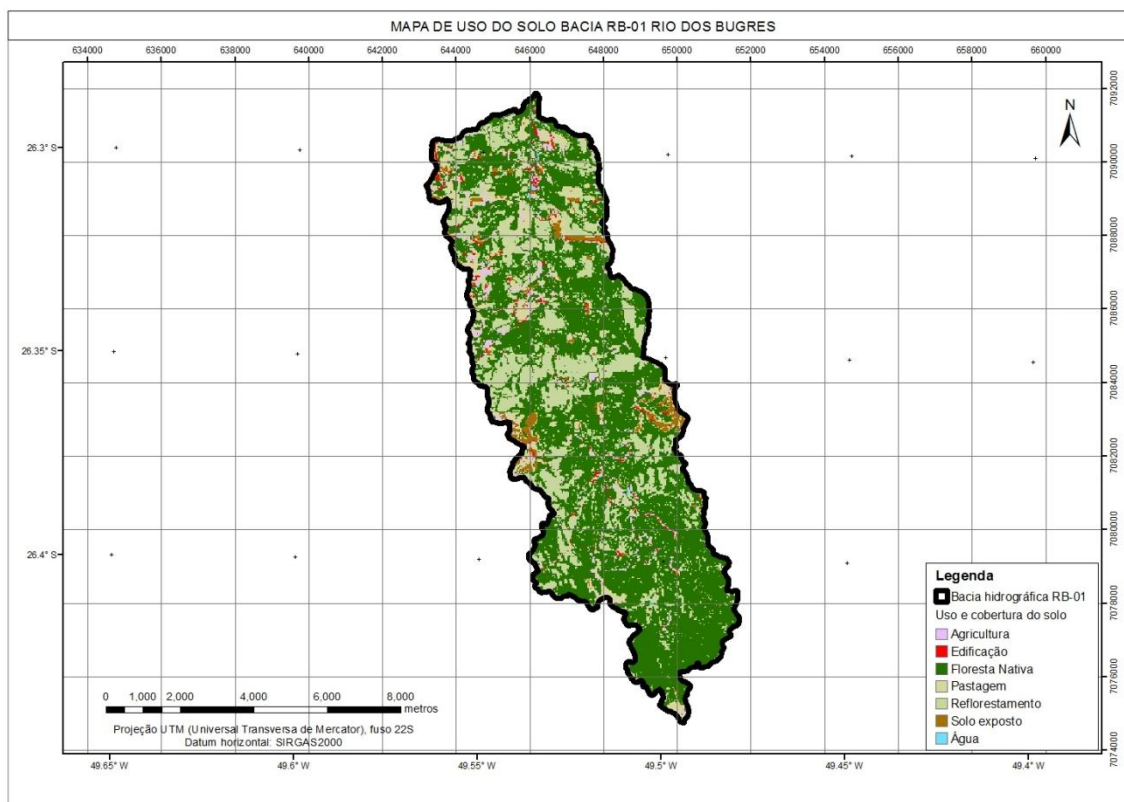
Segundo Cardoso (2014), cambissolos são solos em estágio intermediário de intemperismo, com relação média a alta de silte e argila. São resultado do intemperismo que age sobre rochas sedimentares com elevados teores de matéria orgânica e baixa fertilidade natural, geralmente associados a áreas de relevo ondulado e suave ondulado. Os terrenos associados a esse tipo de solo, possuem baixa a muito baixa permeabilidade. Geralmente são solos pouco profundos, com teores relativamente elevados de minerais primários facilmente intemperizáveis (Santos, 2015). Estão associados à média a alta suscetibilidade à erosão, tendo em vista seu fraco estruturamento e maturidade, principalmente quando associados a relevo forte ondulado em posições mais declivosas da paisagem.



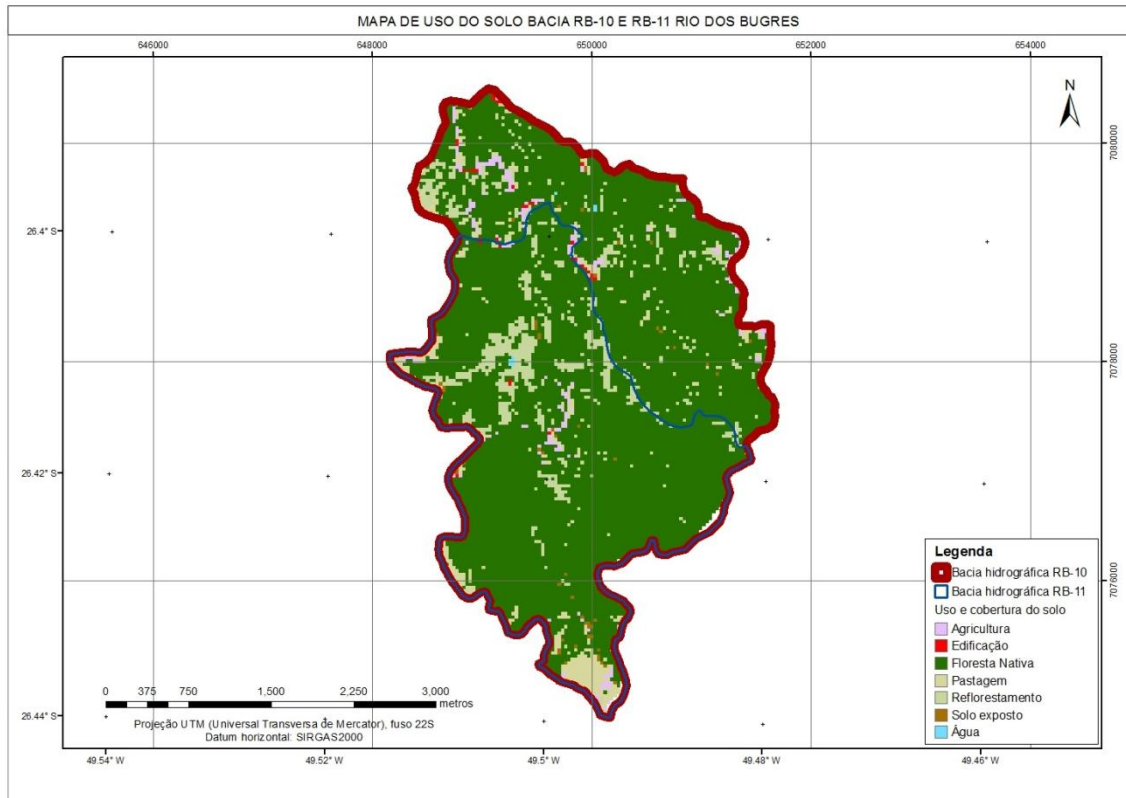
#### 4.1.3. Uso e ocupação do solo

Na área da bacia há o predomínio de mata nativa (Floresta Ombrófila Mista) e de reflorestamento com plantio de *Pinus*, atividade bastante explorada na região do município de Rio Negrinho (Batistel et al, 2017).

Conforme Censi (2019), a caracterização do uso e ocupação do solo na bacia do Rio dos Bugres compõe 7 categorias: floresta nativa, reflorestamento, solo exposto, pastagem, água, edificação e agricultura, como observado nas figuras abaixo.



**Figura 5:** Mapa de uso do solo na bacia RB-01. Fonte: Adaptado de Censi, 2019.



**Figura 6:** Mapa de uso do solo nas sub-bacias RB-10 e RB-11. Fonte: Adaptado de Censi, 2019.

Segundo Cardoso (2014) a área da bacia era composta por mata nativa do tipo Floresta Ombrófila Mista Montana, e conforme procedeu a ocupação humana, parte desta vegetação foi retirada e o solo recebeu novos usos.

Na região mais baixa da bacia, as áreas estão ocupadas com agricultura e pastagem para criação de gado, enquanto nas áreas de cabeceira permanecem florestas, nativas e de reflorestamento.

A bacia RB-10, estabelecida na região de cabeceira da bacia RB-01 RB-11, embutida na bacia RB-10, também localizada na região de cabeceira da bacia RB-01, tem a maior parte de sua área ocupada com floresta nativa e reflorestamento, com uma pequena porção de sua área utilizada para pastagem.

#### 4.2. DADOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS MONITORADOS

Os dados de vazão, precipitação e sedimento em suspensão utilizados como dado de entrada para a modelagem foram obtidos do monitoramento automático com intervalo de amostragem de 10 minutos de estações

fluviométricas instaladas no exutório da Bacia Hidrográfica do Rio dos Bugres (RB-01) e nos exutórios das sub-bacias RB-10 e RB-11, com dados no período compreendido entre os anos de 2011 e 2012, conforme estudos anteriores e monitoramento de Grison (2013) e Cardoso (2014).

As estações fluviométricas foram instaladas no exutório de cada bacia e equipadas com calha Parshal, sensor de nível de altura da lâmina de água, sensor de turbidez (turbidímetro), datalogger e placa solar (Lopes, 2007).

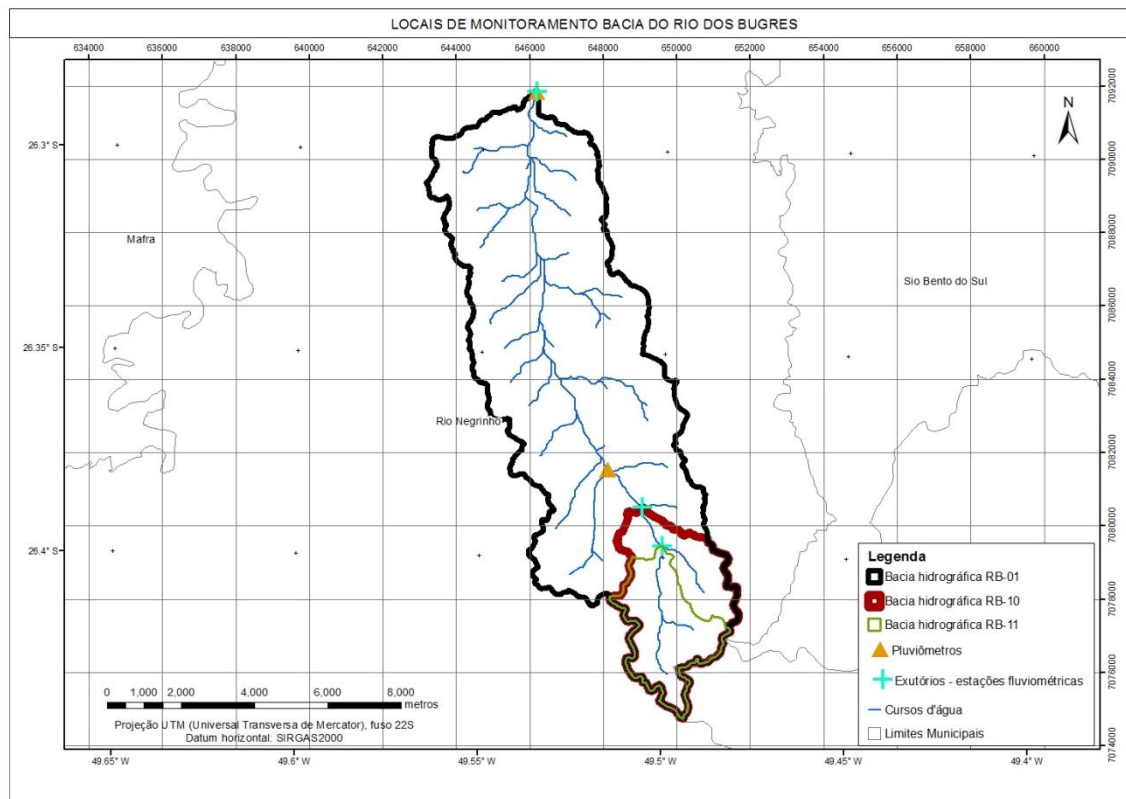
O sensor de nível adquire os dados a partir da pressão exercida pela coluna de água, posteriormente, ocorre a transmissão eletrônica por meio do cálculo e digitalização do sinal emitido pelo sensor, em seguida, o sinal é gravado na memória do suporte eletrônico, e a transmissão do registro é efetuada pela conexão a cabo no computador.

A estação pluviométrica foi instalada ao lado das estações fluviométricas e equipada com pluviógrafo de cubas basculantes com registro em intervalos de 10 minutos, placa solar e datalogger (Lopes, 2007).

O pluviógrafo é um de equipamento automático, que capta bem a variabilidade temporal dos eventos chuvosos, pois permite medir as intensidades das chuvas durante intervalos de tempo inferiores àqueles obtidos com as observações manuais feitas nos pluviômetros. O pluviógrafo foi instalado em local plano, protegido e livre de obstáculos, com o suporte exatamente na vertical, e a área de captação exatamente na horizontal e a 1,50 m de distância do solo.

O pluviógrafo de cubas basculante possui dois recipientes suspensos por um eixo. O conjunto oscila rapidamente quando um dos recipientes contém certa quantidade de água (0,1 mm), e enquanto este se esvazia, o outro recebe a água proveniente do coletor. A cada movimento basculante um mecanismo semelhante ao pêndulo faz uma engrenagem avançar exatamente um dente e esse movimento é transmitido para o sensor de precipitação. Após a transmissão mecânica do sinal, ocorre a gravação dos registros pela memória do datalogger e, por fim, a transmissão é efetuada por uma conexão a cabo no computador (Lopes, 2007).

A localização dos locais de monitoramento pode ser visualizada em relação à bacia RB-01 e suas sub-bacias RB-10 e RB-11 na figura abaixo.



**Figura 7:** Localização das estações de monitoramento.

### 4.3. IDENTIFICAÇÃO E SELEÇÃO DOS EVENTOS

A série de dados contínua utilizada para a análise de eventos compreendeu o período de 16 de dezembro de 2011 a 05 de novembro de 2012. Os dados das estações automáticas de vazão, precipitação e sedimentos em suspensão foram analisados e a série foi dividida em eventos hidrossedimentológicos para realizar as etapas de calibração e validação dos coeficientes da MUSLE.

Na série de dados, houve problemas no monitoramento de precipitação na bacia RB-10 e RB-11, que causaram períodos de falhas entre 29 de junho e 17 de julho (RB-10) e 09 de julho a 16 de julho de 2012 (RB-11).

A série contínua foi dividida em eventos individuais para cada bacia (RB-01, RB-10 e RB-11) utilizando como critério a seleção de eventos representativos que apresentaram hidrograma bem definido com picos de vazão claramente identificados e sedimentograma associado. Os eventos selecionados para cada bacia para validação e calibração do modelo da MUSLE podem ser visualizados no Apêndice I - hidrossedimentogramas para cada bacia durante a série de dados e são os descritos nas tabelas abaixo. A

análise para todas as bacias consiste no uso de todos eventos das bacias individuais reunidos, ou seja, na calibração usou-se todos eventos da calibração na bacia RB-01 e nas sub-bacias RB-10 e RB-11 reunidos. Na validação, foram usados todos eventos das bacias RB-01, RB-10 e RB-11 em conjunto.

**Tabela 2:** Eventos selecionados para calibração e validação do método para a bacia RB-01.

		Evento	Período			Evento	Período
<b>RB-01 Calibração</b>	1	Evento 1	22/12 a 27/12/2012	<b>RB-01 Validação</b>	1	Evento 3	09/01 a 15/01/2012
	2	Evento 5	21/01 a 28/01/2012		2	Evento 27	11/07 a 13/07/2012
	3	Evento 18	24/04 a 30/04/2012		3	Evento 30	29/07 a 01/08/2012
	4	Evento 22	03/06 a 07/06/2012		4	Evento 31	09/09 a 12/09/2012
	5	Evento 23	10/06 a 12/06/2012		5	Evento 35	10/10 a 15/10/2012
	6	Evento 24	17/06 a 19/06/2012		6	Evento 36	22/10 a 24/10/2012
	7	Evento 28	16/07 a 19/07/2012		7	Evento 38	31/10 a 01/11/2012
	8	Evento 29	25/07 a 29/07/2012				
	9	Evento 33	21/09 a 01/08/2012				
	10	Evento 37	25/10 a 28/10/2012				

**Tabela 3:** Eventos selecionados para calibração e validação do método para a bacia RB-10.

		Evento	Período			Evento	Período
<b>RB-10 Calibração</b>	1	Evento 2_B1	22/12 a 23/12/2011	<b>RB-10 Validação</b>	1	Evento 3_B1	23/12 a 24/12/2011
	2	Evento 4_B1	24/12 a 27/12/2011		2	Evento 37_B1	28/04 a 29/04/2012
	3	Evento 6_B1	30/12/11 a 02/01/2012		3	Evento 40_B1	03/06 a 06/06/2012
	4	Evento 11_B1	13/01 a 15/01/2012		4	Evento 41_B1	10/06 a 11/06/2012
	5	Evento 13_B1	21/01 a 22/01/2012		5	Evento 42_B1	17/06 a 19/06/2012
	6	Evento 14_B1	22/01 a 24/01/2012		6	Evento 3_B2	26/07 a 18/07/2012
	7	Evento 36_B1	25/04 a 27/04/2012		7	Evento 10_B2	25/09 a 26/09/2012
	8	Evento 38_B1	24/05 a 26/05/2012				
	9	Evento 1_B2	17/07 a 18/07/2012				
	10	Evento 5_B2	29/07 a 01/08/2012				

**Tabela 4:** Eventos selecionados para calibração e validação do método para a bacia RB-11.

		Evento	Período			Evento	Período
<b>RB-11 Calibração</b>	1	Evento 4	08/01 a 11/01/2012	<b>RB-11 Validação</b>	1	Evento 2	22/12 a 02/01/2012
	2	Evento 5	13/01 a 19/01/2012		2	Evento 3	04/01 a 08/01/2012
	3	Evento 6	21/01 a 24/01/2012		3	Evento 22	13/04 a 15/04/2012
	4	Evento 24	23/04 a 27/04/2012		4	Evento 25	28/04 a 30/04/2012
	5	Evento 28	10/06 a 12/06/2012		5	Evento 26	23/05 a 27/05/2012
	6	Evento 29	17/06 a 23/06/2012		6	Evento 27	30/05 a 07/06/2012
	7	Evento 1 - B2	16/07 a 19/07/2012				
	8	Evento 2 - B2	25/07 a 01/08/2012				

**Tabela 5:** Eventos selecionados para calibração e validação do método para todas bacias.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>RB-01</b>	Calibração	Evento 1	Evento 5	Evento 18	Evento 22	Evento 23	Evento 24	Evento 28	Evento 29	Evento 33	Evento 37
	Validação	Evento 3	Evento 27	Evento 30	Evento 31	Evento 35	Evento 36	Evento 38			
<b>RB-10</b>	Calibração	Evento 2_B1	Evento 4_B1	Evento 6_B1	Evento 11_B1	Evento 13_B1	Evento 14_B1	Evento 36_B1	Evento 38_B1	Evento 1_B2	Evento 5_B2
	Validação	Evento 3_B1	Evento 37_B1	Evento 40_B1	Evento 41_B1	Evento 42_B1	Evento 3_B2	Evento 10_B2			
<b>RB-11</b>	Calibração	Evento 4	Evento 5	Evento 6	Evento 24	Evento 28	Evento 29	Evento 1 - B2	Evento 2 - B2		
	Validação	Evento 2	Evento 3	Evento 22	Evento 25	Evento 26	Evento 27				

#### 4.4. MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA

A fim de espacializar a equação MUSLE para toda a extensão da bacia hidrográfica analisada, foi utilizado o software ArcGis 10.5.1. Como dados de entrada, foram usados os seguintes dados:

- a delimitação da bacia, conforme estudos prévios;
- o mapa de solos de Santa Catarina em escala 1:250.000 elaborado pelo Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (EPAGRI/CIRAM, 2004);
- o modelo digital de terreno da região ALOS-PALSAR (resolução de 12.5 m); e
- mapa de uso do solo da bacia, elaborado por Censi (2019), estudo prévio.

Os parâmetros K, LS, C e P foram determinados a partir de dados pedológicos, de dados topográficos, de uso e ocupação do solo, e de práticas conservacionistas, respectivamente.

De posse desses parâmetros da MUSLE em formato raster, aplicou-se a estatística zonal para obtenção dos parâmetros médios na Bacia dos Rio dos Bugres e nas suas sub-bacias RB-10 e RB-11.

Considerou-se valores médios e constantes dos parâmetros K, LS, C e P no ano de monitoramento, admitindo, portanto, que não mudaram no período de tempo analisado.

##### 4.4.1. Fator Erodibilidade do Solo (K)

Os tipos de solos que ocorrem na região da bacia hidrográfica do Rio dos Bugres foram extraídos do mapa de solos de Santa Catarina, elaborado pela EPAGRI/CIRAM em escala 1:250.000. O mapa original é anterior a nova nomenclatura do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). Portanto, utilizou-se a classificação dos tipos de solo de ocorrência na área em primeira classe, que identificou as áreas como cambissolo háplico e cambissolo húmico.

A erodibilidade do solo (fator K), foi obtida a partir de informações dos tipos de solo da região, busca na literatura de valores para K atribuídos aos

tipos de solo e reclassificação numérica do mapa para a bacia hidrográfica. Os valores de K foram obtidos na literatura, conforme descrito na tabela abaixo (Tabela 6).

**Tabela 6:** Valores de K para os tipos de solo da bacia hidrográfica do Rio dos Bugres.

Descrição	Fator K (Mg.h-1.MJ.mm-1)	Referência
<b>Cambissolo Háplico</b>	0,06	Costa et al. (2009)
<b>Cambissolo Húmico</b>	0,0175	Schick et al 2014

#### 4.4.2. Fator Topográfico (LS)

Para a caracterização das declividades do terreno, operou-se com uma imagem ALOS PALSAR de Modelo Digital de Elevação alta resolução corrigida a partir da reamostragem do SRTM (“Shuttle Radar Topography Mission”).

O download da imagem foi feito no portal EarthData da NASA, referente à imagem de 19 de novembro de 2011, com resolução espacial de 12.5 metros.

A classificação das classes de declividades seguiu os critérios apresentados pela EMBRAPA (2006), conforme Tabela 7. Observa-se que as unidades que predominam na bacia hidrográfica são terrenos ondulado a forte ondulado.

**Tabela 7:** Classificação do relevo da bacia de acordo com declividades.

Declividade (%)	Classificação
<b>0 a 3%</b>	Plano
<b>3 a 8%</b>	Suave Ondulado
<b>8 a 20%</b>	Ondulado
<b>20 a 45%</b>	Forte Ondulado
<b>45 a 75%</b>	Montanhoso
<b>&gt;75%</b>	Escarpado

Na tabela abaixo consta as áreas ocupadas por cada classe de declividade e suas respectivas porcentagens em relação à área total da bacia.

**Tabela 8:** Declividades e suas distribuições na bacia hidrográfica do Rio dos Bugres.

Declividade (%)	% na bacia RB-01	% na bacia RB-10	% na bacia RB-11
<b>0 a 3%</b>	2,83	1,21	1,47
<b>3 a 8%</b>	11,01	12,41	15,62
<b>8 a 20%</b>	41,91	46,00	50,89
<b>20 a 45%</b>	34,21	37,92	31,29
<b>45 a 75%</b>	9,41	2,43	0,73
<b>&gt;75%</b>	0,63	0,02	0,00

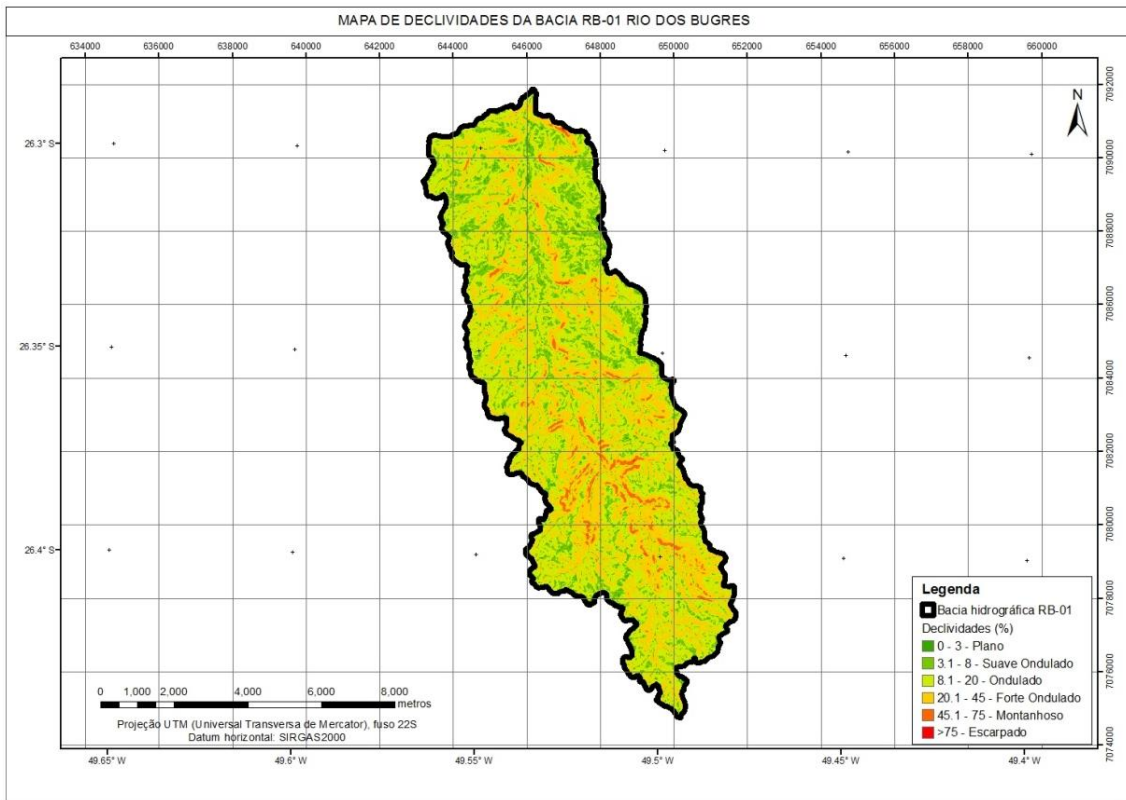


Figura 8: Mapa de declividades da bacia RB-01 conforme classificação EMBRAPA (2006).

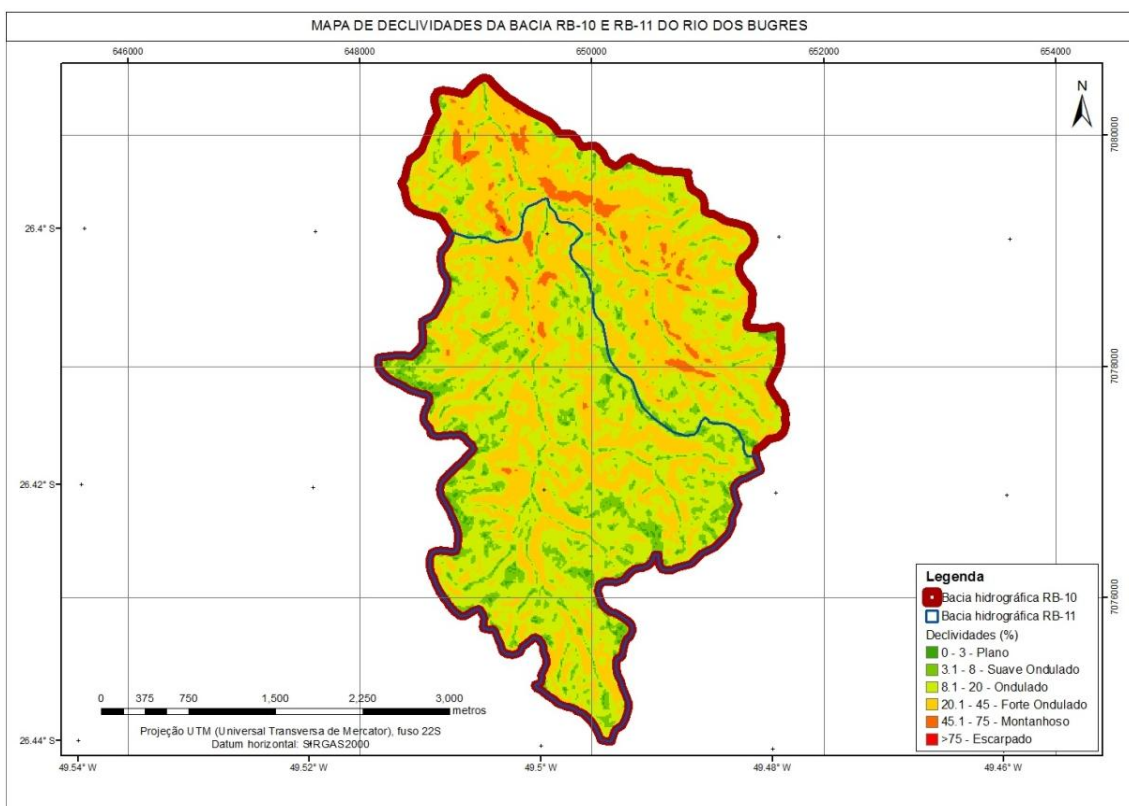


Figura 9: Mapa de declividades da bacia RB-10 e RB-11 conforme classificação EMBRAPA (2006).



Observa-se que predominam áreas de terreno ondulado (com declividades de 3% a 20%) na bacia RB-01 e nas bacias RB-10 e RB-11. Relevo do tipo forte ondulado ocorre principalmente na cabeceira da bacia RB-01 e em toda a região das duas sub-bacias. Embora de forma menos expressiva, há a ocorrência de encostas montanhosas e escarpadas, onde a inclinação é maior do que 45%.

O fator de comprimento da vertente e declividade do terreno (fator LS) foi obtido a partir da extração do MDE - Modelo Digital de Elevação/ALOS das declividades dos pixels a partir da ferramenta "slope" para gerar o mapa de declividades (Figura 10) e se calculou: primeiro, as direções de fluxo através do procedimento "flow direction" e depois, se calculou quantas células drenam para cada célula da bacia através do procedimento "flow accumulation" (Figura 11). A área acumulada em cada pixel corresponde ao somatório das áreas das superfícies de todos os pixels de montante. Não foi usado limitador de área acumulada na obtenção do fator LS.

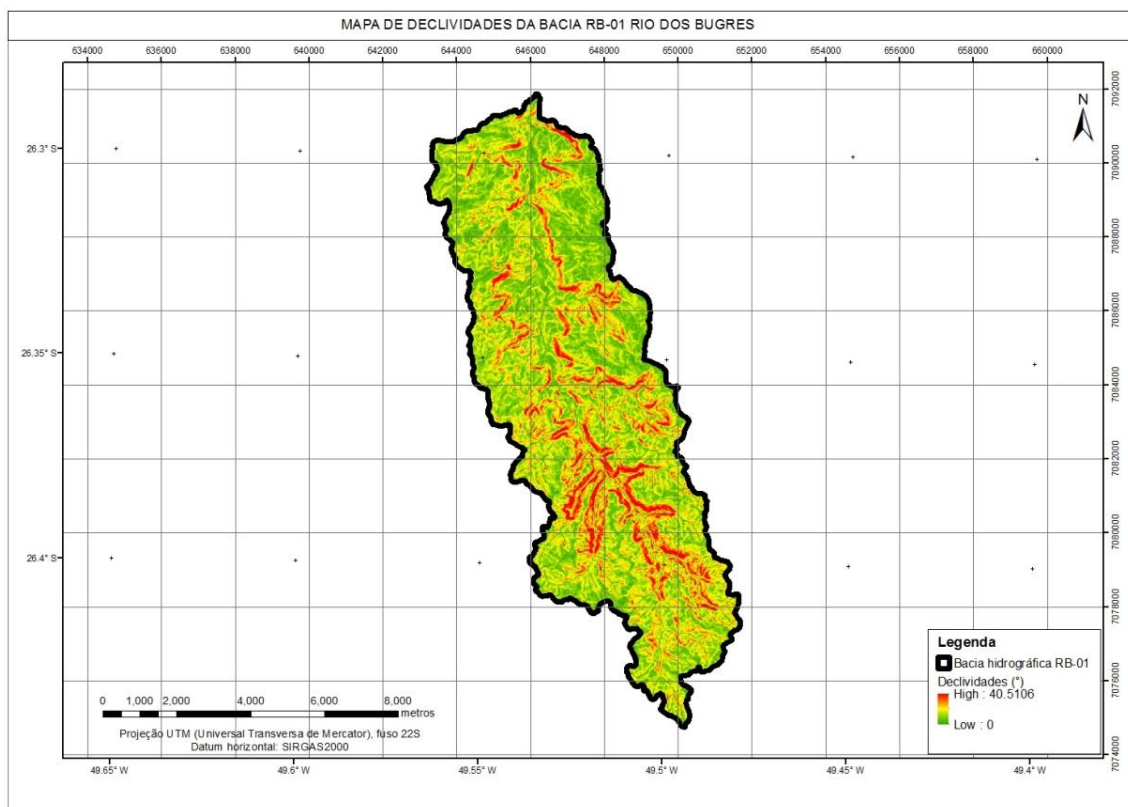


Figura 10: Mapa de declividades.

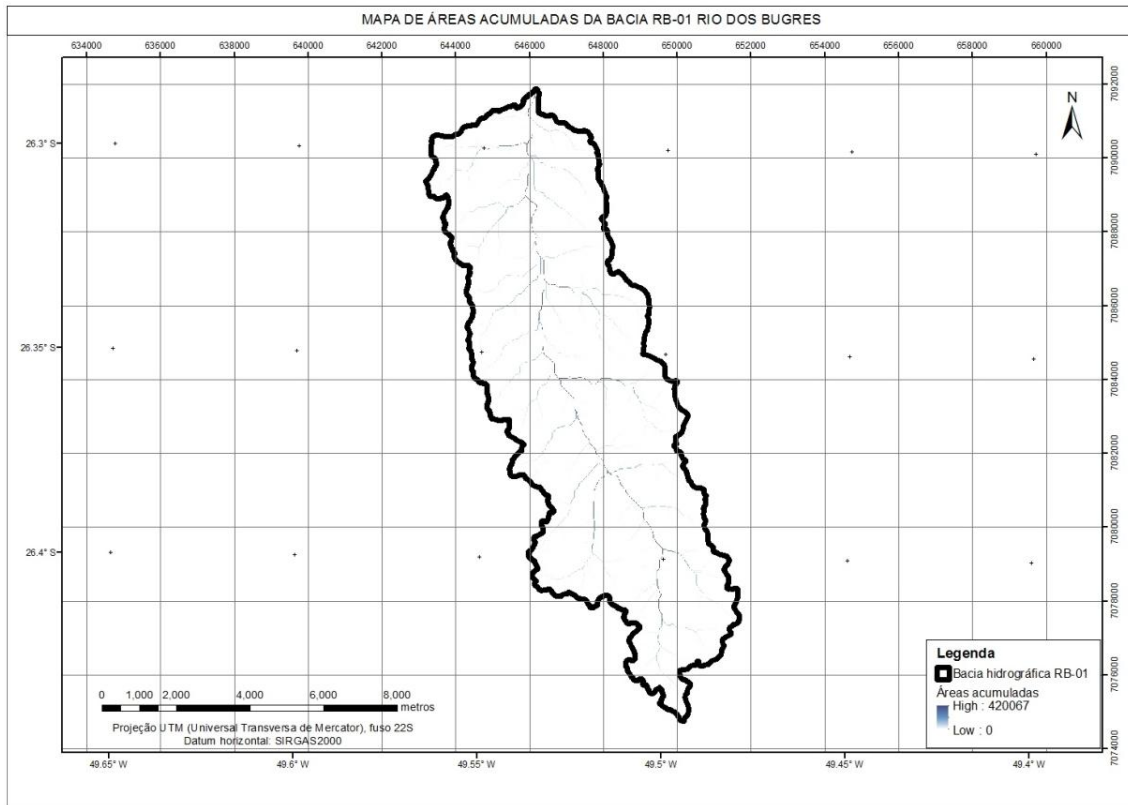


Figura 11: Mapa de áreas acumuladas.

O fator LS foi calculado utilizando a ferramenta "calculadora raster", conforme método Moore e Burch (1986), a partir de dados topográficos, pela relação:

$$LS = \left( \frac{\text{Área\_Acumulada} * \text{Tamanho\_da\_célula}}{22,13} \right)^{0,4} * \left( \frac{\text{seno}(\text{Declividade} * \frac{\pi}{180})}{0,0896} \right)^{1,3}$$

(Equação 8)

Onde:

- LS é o fator LS da MUSLE;
- Área\_Acumulada é o mapa de áreas acumuladas;
- Tamanho\_da\_célula é a resolução espacial do pixel, neste caso 12.5 m;
- Declividade é o mapa de declividades em graus.

#### 4.4.3. Fator Uso e Manejo do Solo (C)

A caracterização do uso e ocupação do solo na bacia do Rio dos Bugres foi elaborada a partir da classificação supervisionada de imagem de satélite conforme metodologia e resultados de Censi (2019). As áreas ocupadas por cada uso registrado e suas respectivas porcentagens em relação à área total da bacia, estão descritas na tabela abaixo.

**Tabela 9:** Tipos de uso do solo e suas distribuições na bacia hidrográfica do Rio dos Bugres.

<b>Uso e ocupação do solo</b>	<b>% na bacia RB-01</b>	<b>% na bacia RB-10</b>	<b>% na bacia RB-11</b>
Floresta Nativa	59,49	84,19	84,33
Reflorestamento	22,98	13,23	8,42
Solo Exposto	3,40	0,99	0,67
Pastagem	9,12	7,43	5,05
Água	0,16	0,10	0,07
Edificação	1,37	0,56	0,10
Agricultura	3,48	3,68	1,36

Para a elaboração do mapa do fator cobertura e manejo do solo (C), utilizou-se o mapa de uso e ocupação do solo da área de estudo produzido por Censi (2019) e os valores do fator C, para cada uma das classes identificadas, foram extraídos da literatura, conforme apresentado na tabela abaixo.

**Tabela 10:** Valores do fator C obtidos da literatura.

<b>Classes de uso do solo</b>	<b>Fator C</b>	<b>Referência</b>
Floresta nativa	0,0005	Costa et al (2009)
Reflorestamento	0,004	Checchia (2005)
Solo exposto	1	Checchia (2005)
Pastagem	0,03	Santos (2019)
Água	0	Santos (2019)
Edificação	0	Santos (2019)
Agricultura	0,1	Santos (2019)

#### 4.4.4. Fator Práticas Conservacionistas (P)

As práticas conservacionistas controlam a erosão por meio da redução da velocidade e da capacidade de transporte da enxurrada. São exemplos de práticas conservacionistas: o cultivo em contorno, o cultivo em faixas com rotação de culturas e o terraceamento, com efeito de redução da erosão hídrica potencializado quando associadas às práticas de manejo do solo.

A aplicação de práticas conservacionistas na bacia geraria um valor reduzido da MUSLE calculada. Como não foram identificadas na bacia, aplicou-se o método no pior cenário, de nenhuma prática conservacionista aplicada (P igual a 1).

#### 4.4.5. Fator de Escoamento Superficial e Vazão de Pico (Q e qp)

A partir dos dados contínuos do monitoramento da bacia do rio dos Bugres, e de suas duas sub-bacias, foram selecionados 5 períodos para análise da recessão do hidrograma e obtenção dos coeficientes de recessão (constante de recessão "Kmédio", taxa de variação "a", e índice de fluxo de base "BFI<sub>max</sub>") para a bacia RB-01, para a bacia RB-10 e para a bacia RB-11. Os períodos usados na análise e as constantes de recessão obtidas estão indicados na tabela abaixo.

**Tabela 11: Constantes de recessão.**

RB-01		RB-10		RB-11		
ID	Período	K	Período	K	Período	K
1	24 dez/2011 - 20 jan/2012	1030,53	23 jan/2012 - 12 abr/2012	1750,50	14 jan/2012 - 21 mar/2012	1571,90
2	24 jan/2011 - 23 abr/2012	1582,15	26 abr/2012 - 21 mai/2012	444,04	26 abr/2012 - 22 mai/2012	484,49
3	26 abr/2012 - 29 mai/2012	596,16	25 mai/2012 - 02 jun/2012	261,59	25 mai/2012 - 01 jun/2012	202,97
4	5 jun/2012 - 26 jul/2012	685,86	04 jun/2012 - 26 jun/2012	357,89	04 jun/2012 - 05 jul/2012	512,36
5	27 jul/2012 - 5 nov/2012	1219,85	27 jul/2012 - 08 set/2012	585,07	27 jul/2012 - 09 out/2012	1019,47
	<b>Kmédio</b>	<b>1022,91</b>	<b>Kmédio</b>	<b>679,82</b>	<b>Kmédio</b>	<b>758,24</b>
	<b>Taxa de variação "α"</b>	<b>0,9990</b>	<b>Taxa de variação "α"</b>	<b>0,9985</b>	<b>Taxa de variação "α"</b>	<b>0,9987</b>

A série da RB-10 e da RB-11 apresentou falhas nas medições e por esse motivo, os valores obtidos para BFI foram descartados, sendo usado o BFI<sub>max</sub> obtido na análise da bacia RB-01.

Para cada evento foi realizada a separação do escoamento superficial do fluxo de base, usando o método de regressão de Eckhardt. O volume de escoamento superficial de cada evento é dado pela diferença entre a vazão total observada e a vazão de base obtida pelo filtro numérico de Eckhardt, em

cada medida de intervalo de 10 minutos. A vazão de pico é a máxima vazão observada em cada evento de chuva.

#### 4.4.6. Coeficientes $\alpha$ e $\beta$ da MUSLE

O cálculo dos coeficientes da MUSLE foi feito através de regressão segundo a equação abaixo:

$$Z = \alpha X^\beta \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

$$Z = \frac{Y}{K*LS*C*P} \text{ e } X = (Q * q_p)$$

A calibração dos coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  foi feita a partir dos dados obtidos no monitoramento dos eventos. O procedimento consistiu na estimativa dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  com base na equação 9, utilizando os eventos da tabela 1 para cada bacia estudada. Além disso, foram aplicados os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  originais de 11,8 e 0,56 da equação MUSLE a fim de comparar o nível de discrepância na estimativa da produção de sedimentos sem o ajuste dos coeficientes.

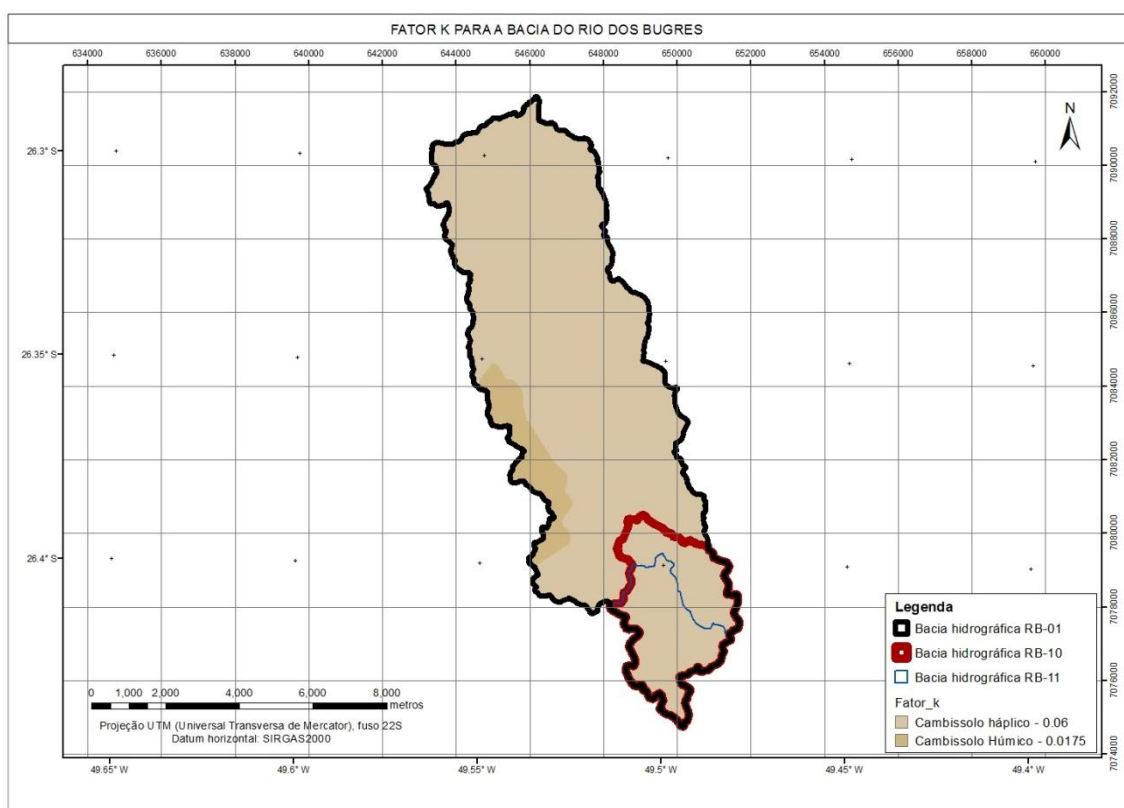
#### 4.4.7. Calibração e Validação da MUSLE

Foram escolhidos eventos na série contínua de monitoramento das bacias, para compor a calibração e a validação manual do modelo. Procurou-se selecionar eventos de diferentes magnitudes para compor cada etapa. Foi feito o ajuste da equação do tipo potencia para obtenção dos coeficientes da MUSLE. Para cada conjunto de eventos selecionados, para a bacia RB-01, para a bacia RB-10, para a bacia RB-11 e para todas juntas, foi obtido um par de coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$ . Para a validação do modelo, aplicou-se esses coeficientes aos eventos não utilizados na calibração do modelo, para cada uma das bacias individuais e para as três bacias em conjunto, utilizando os eventos descritos no item 4.3.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

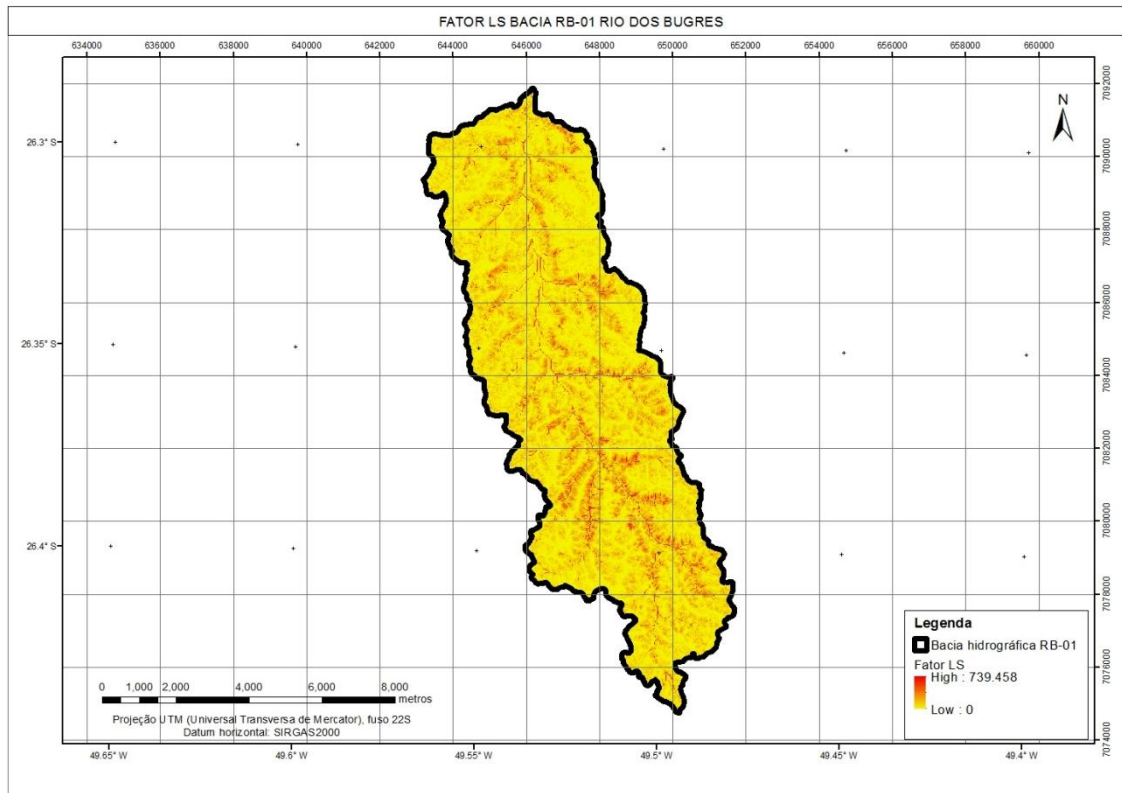
### 5.1. Fatores MUSLE

A erodibilidade do solo (fator K), foi obtida a partir de informações dos tipos de solo de ocorrência na bacia, e atribuição de valores para o fator K associados à pedologia, segundo a bibliografia. Foi feita reclassificação numérica do parâmetro para a bacia hidrográfica e a espacialização do fator K obtida é dada pela Figura 12.



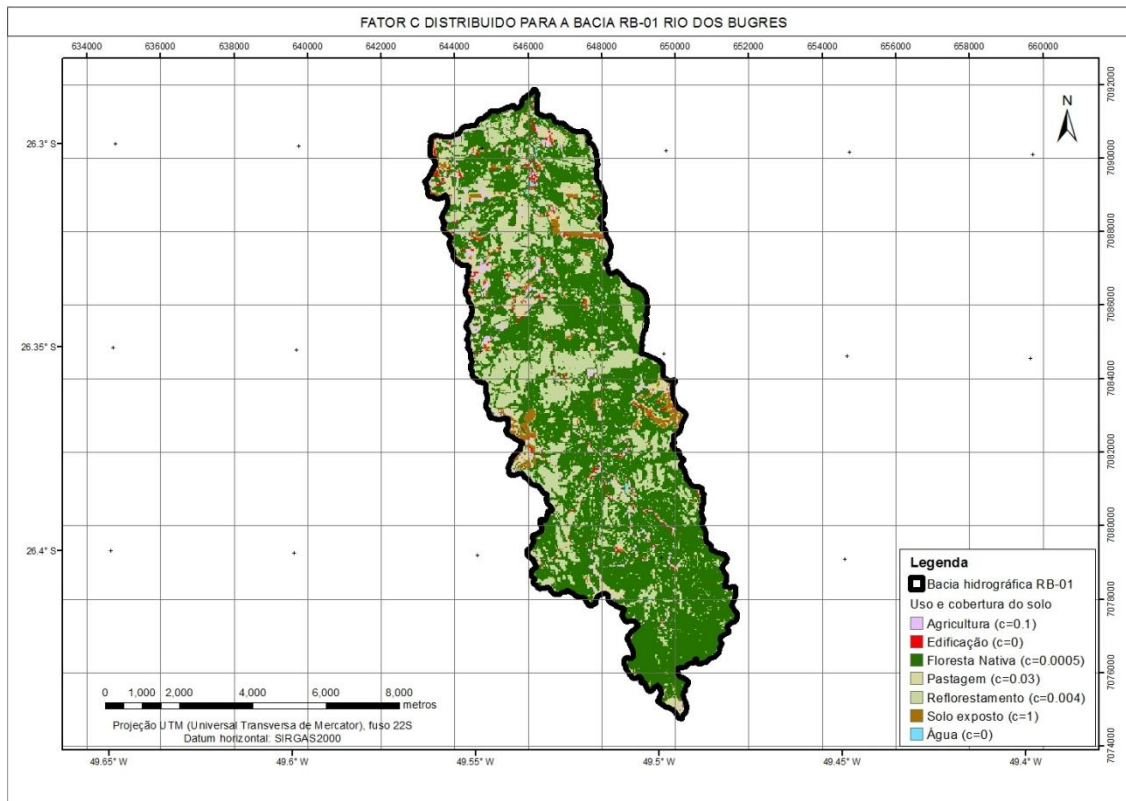
**Figura 12:** Mapa da distribuição espacial dos tipos de solo da Bacia do Rio dos Bugres, fator K. Fonte: Adaptado de EPAGRI/CIRAM,2004.

O fator LS, resultante do cálculo raster a partir de dados de declividade e áreas acumuladas, tem sua espacialização para a bacia como apresentado na Figura 13.

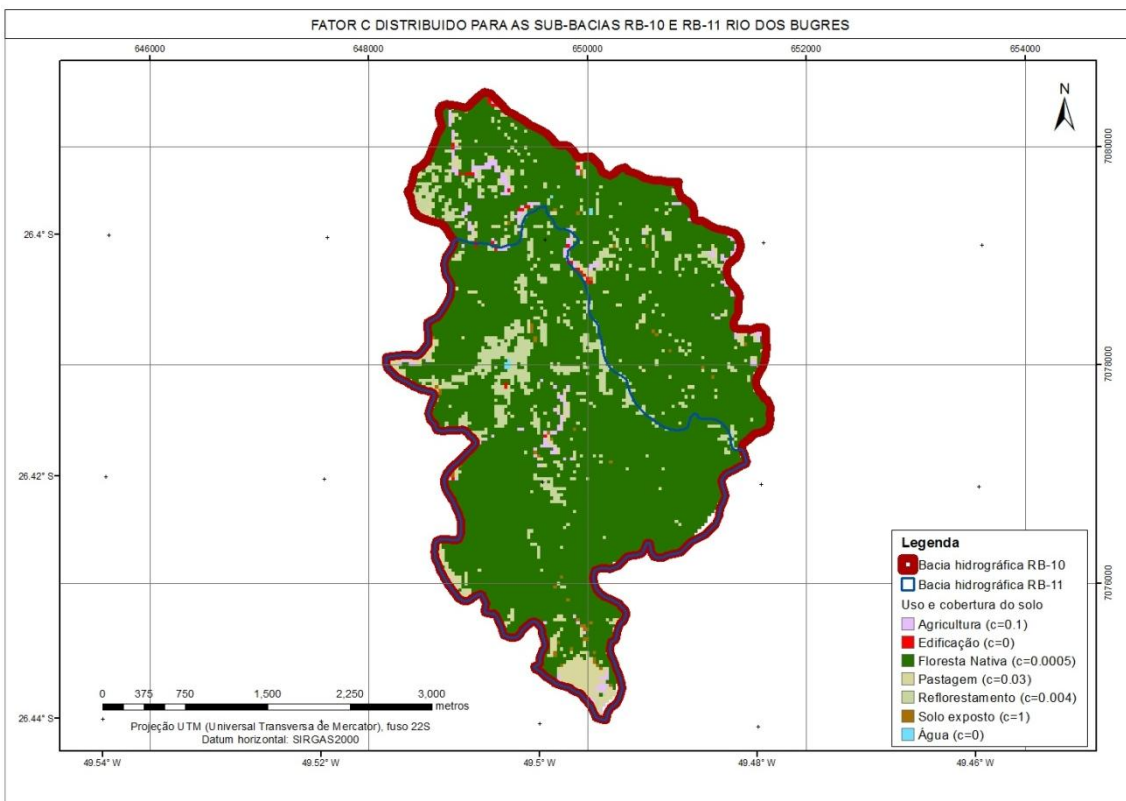


**Figura 13:** Mapa do fator LS da MUSLE.

Os valores atribuídos ao fator C conforme uso do solo e consulta bibliográfica, foram inseridos em um campo específico da tabela de atributos do shapefile, e foi gerado o mapa do fator C em formato raster, utilizando a função Polygon to Raster do ArcGIS. O mapa distribuído do fator C obtido para a bacia é dado pela Figura 14 e na Figura 15 observa-se em maior detalhe a espacialização para as sub-bacias RB-10 e RB-11.



**Figura 14:** Mapa distribuído do fator C, representado pela distribuição de uso do solo na bacia conforme critérios adotados. Fonte: Adaptado de Censi, 2019.



**Figura 15:** Mapa distribuído do fator C, representado pela distribuição de uso do solo nas sub-bacias RB-10 e RB-11 conforme critérios adotados. Fonte: Adaptado de Censi, 2019.



Como não foram identificadas na bacia práticas conservacionistas, considerou-se o pior cenário, de nenhuma prática conservacionista aplicada, ou seja, atribuiu-se ao fator P o valor de 1 para toda a bacia.

Assim, para cada pixel que compõe a bacia do Rio dos Bugres, e suas duas sub-bacias RB-10 e RB-11, foram calculados os fatores K, LS, C e P, conforme item 4.4. Os valores médios de cada fator em cada bacia estão resumidos na tabela abaixo.

**Tabela 12:** Valores médios dos fatores K, LS, C e P das bacias em estudo.

Fator	RB-01	RB-10	RB-11
K	0,05	0,06	0,06
LS	4,59	4,86	3,88
C	0,04	0,01	0,01
P	1	1	1

As constantes de recessão obtidas para a separação do escoamento, e obtenção da vazão superficial, para cada bacia, são identificadas na tabela abaixo.

**Tabela 13:** Constantes de recessão.

	RB-01	RB-10	RB-11
Constante de recessão média "k"	1022,91	679,82	758,24
Taxa de variação "a"	0,9990	0,9985	0,9987
Índice de fluxo de base "BFImax"	0,3739	0,3739	0,3739

Os hidrogramas obtidos com a separação do escoamento a partir do método empregado podem ser visualizados no Apêndice II. Os valores obtidos após a separação do escoamento, para volume de escoamento superficial e de vazões de pico para cada evento em cada bacia estão evidenciados na tabela abaixo.

**Tabela 14:** Vazões de pico em cada evento selecionado para a bacia RB-01, RB-10 e RB-11.

Bacia	Evento	Volume de escoamento	Vazão de pico (qp)
		superficial (m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> /s)
<b>RB-01</b>	Evento 1	8,46 x 10 <sup>5</sup>	10,21
	Evento 3	6,61 x 10 <sup>5</sup>	9,17
	Evento 5	2,47 x 10 <sup>6</sup>	23,74
	Evento 18	3,54 x 10 <sup>6</sup>	52,98
	Evento 22	2,21 x 10 <sup>7</sup>	368,71
	Evento 23	1,05 x 10 <sup>6</sup>	18,18
	Evento 24	1,03 x 10 <sup>6</sup>	19,28
	Evento 27	1,69 x 10 <sup>5</sup>	2,30
	Evento 28	4,55 x 10 <sup>5</sup>	5,55
	Evento 29	1,49 x 10 <sup>7</sup>	260,39
	Evento 30	5,15 x 10 <sup>5</sup>	9,30
	Evento 31	8,59 x 10 <sup>4</sup>	0,58
	Evento 33	6,48 x 10 <sup>4</sup>	0,92
	Evento 35	1,69 x 10 <sup>5</sup>	0,60
	Evento 36	1,79 x 10 <sup>5</sup>	3,92
	Evento 37	4,30 x 10 <sup>5</sup>	8,16
	Evento 38	7,12 x 10 <sup>4</sup>	0,91
	<b>RB-10</b>	Evento 2_B1	1,25 x 10 <sup>4</sup>
Evento 3_B1		2,16 x 10 <sup>4</sup>	0,67
Evento 4_B1		5,22 x 10 <sup>4</sup>	0,39
Evento 6_B1		4,70 x 10 <sup>4</sup>	0,65
Evento 11_B1		1,11 x 10 <sup>5</sup>	2,54
Evento 13_B1		5,04 x 10 <sup>4</sup>	2,58
Evento 14_B1		1,34 x 10 <sup>5</sup>	2,88
Evento 36_B1		1,55 x 10 <sup>4</sup>	7,66
Evento 37_B1		1,80 x 10 <sup>5</sup>	4,23
Evento 38_B1		1,03 x 10 <sup>5</sup>	2,55
Evento 40_B1		1,26 x 10 <sup>5</sup>	43,47
Evento 41_B1		1,31 x 10 <sup>6</sup>	1,93
Evento 42_B1		7,98 x 10 <sup>4</sup>	2,04
Evento 1_B2		9,01 x 10 <sup>4</sup>	1,73
Evento 3_B2		6,86 x 10 <sup>4</sup>	33,80
Evento 5_B2		2,04 x 10 <sup>4</sup>	1,01
Evento 10_B2	9,03 x 10 <sup>5</sup>	0,75	
<b>RB-11</b>	Evento 2	7,65 x 10 <sup>4</sup>	0,38
	Evento 3	1,66 x 10 <sup>4</sup>	0,35
	Evento 4	4,94 x 10 <sup>4</sup>	0,29
	Evento 5	8,79 x 10 <sup>4</sup>	1,78
	Evento 6	3,20 x 10 <sup>4</sup>	1,24
	Evento 22	1,90 x 10 <sup>6</sup>	0,09
	Evento 25	1,14 x 10 <sup>5</sup>	2,54
	Evento 26	8,06 x 10 <sup>4</sup>	1,71
	Evento 27	1,33 x 10 <sup>4</sup>	14,35
	Evento 28	4,49 x 10 <sup>3</sup>	1,15
	Evento 29	7,77 x 10 <sup>3</sup>	1,05
	Evento 1 - B2	8,04 x 10 <sup>3</sup>	1,05
Evento 2 - B2	1,12 x 10 <sup>5</sup>	8,56	

## 5.2. Análise do Comportamento Hidrossedimentológico

A produção de sedimentos observada nos eventos considerados no presente estudo, encontra-se resumida na tabela abaixo. Considerando a área

das bacias, bacia RB-01 de 66,41 km<sup>2</sup>, bacia RB-10 de 11,45 km<sup>2</sup> e bacia RB-11 de 6,97 km<sup>2</sup>, foi feita a estimativa da produção de sedimentos específica para cada evento.

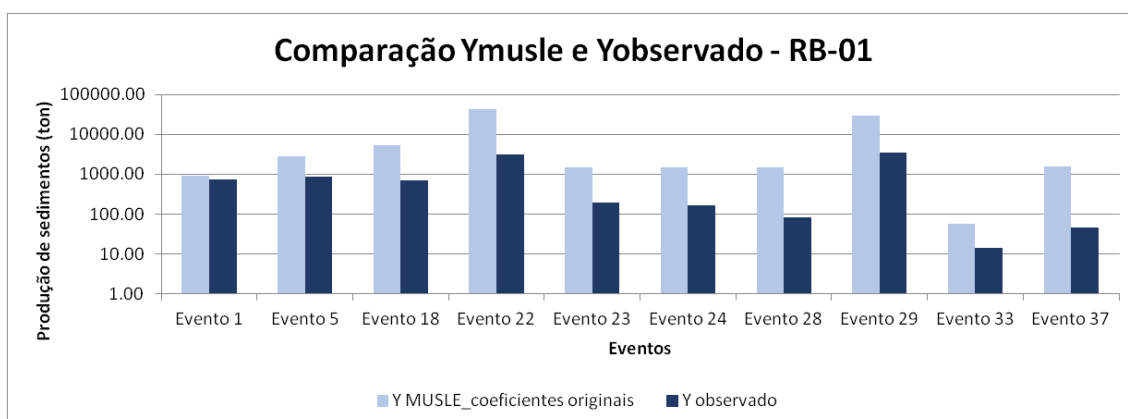
**Tabela 15:** Produção de sedimentos observada e produção de sedimentos específica.

Bacia	Etapa	Evento	Y observado (ton)	Y específico (ton/km <sup>2</sup> )
RB-01	Calibração	Evento 1	725,64	10,93
		Evento 5	846,11	12,74
		Evento 18	688,73	10,37
		Evento 22	3190,70	48,04
		Evento 23	193,10	2,91
		Evento 24	169,16	2,55
		Evento 28	81,84	1,23
		Evento 29	3404,28	51,26
		Evento 33	14,36	0,22
	Evento 37	46,53	0,70	
	Validação	Evento 3	237,37	3,57
		Evento 27	38,52	0,58
		Evento 30	173,57	2,61
		Evento 31	4,06	0,06
Evento 35		1,92	0,03	
Evento 36		23,48	0,35	
Evento 38		7,44	0,11	
RB-10	Calibração	Evento 2_B1	2,13	0,19
		Evento 4_B1	1,41	0,12
		Evento 6_B1	1,73	0,15
		Evento 11_B1	12,61	1,10
		Evento 13_B1	10,94	0,96
		Evento 14_B1	11,89	1,04
		Evento 36_B1	30,07	2,63
		Evento 38_B1	8,75	0,76
	Validação	Evento 1_B2	3,81	0,33
		Evento 5_B2	3,07	0,27
RB-11	Validação	Evento 3_B1	4,77	0,42
		Evento 37_B1	8,49	0,74
		Evento 40_B1	167,42	14,62
		Evento 41_B1	4,48	0,39
		Evento 42_B1	3,44	0,30
		Evento 3_B2	99,33	8,68
		Evento 10_B2	1,18	0,10
RB-11	Calibração	Evento 4	1,00	0,14
		Evento 5	10,87	1,56
		Evento 6	5,91	0,85
		Evento 24	18,48	2,65
		Evento 28	2,66	0,38
		Evento 29	2,43	0,35
		Evento 1 - B2	2,66	0,38
	Evento 2 - B2	337,66	48,42	
	Validação	Evento 2	2,85	0,41
		Evento 3	1,51	0,22
Evento 22		0,22	0,03	
Validação	Evento 25	4,67	0,67	
	Evento 26	5,94	0,85	
	Evento 27	85,19	12,22	

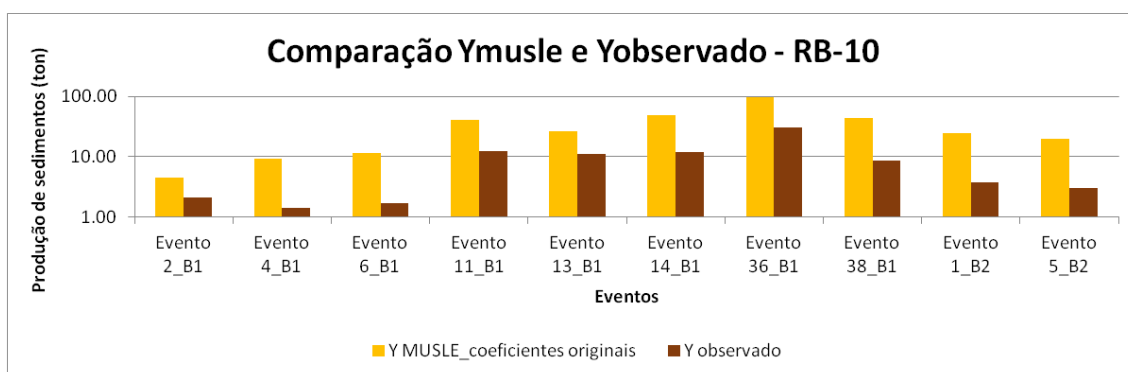
Os valores obtidos para produção de sedimentos específica indica maior produção de sedimentos na bacia maior (RB-01), apesar de haver eventos individuais nas bacias menores da ordem de 14,62 ton/km<sup>2</sup> (Evento 40\_B1 da RB-10), 48,42 ton/km<sup>2</sup> (Evento 2-B2 da RB-11) e 12,22 (Evento 27 da RB-11).

### 5.3.1. Equação MUSLE Original

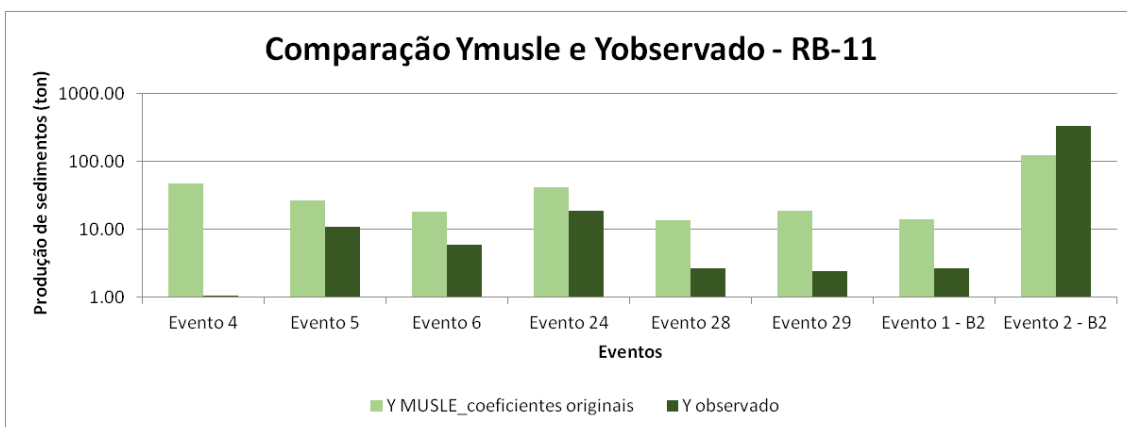
A estimativa da produção de sedimentos para a bacia do Rio dos Bugres calculada pela equação MUSLE usando os coeficientes originais do modelo ( $\alpha = 11,8$  e  $\beta = 0,56$ ) foi comparada com os dados medidos em campo, para a bacia RB-01 (Figura 16), para a bacia RB-10 (Figura 17), para a bacia RB-11 (Figura 18) e para as três bacias juntas (Figura 19). A análise do erro percentual da produção de sedimentos aproximada pela MUSLE com os coeficientes originais, em relação ao medido e observado em campo, em cada evento individual levado em consideração neste estudo, encontra-se na Tabela 16.



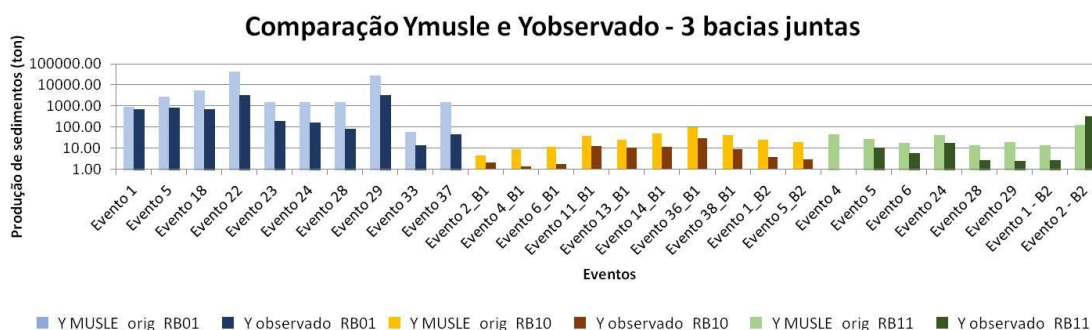
**Figura 16:** Produção de sedimentos estimados pela MUSLE com os coeficientes originais e produção de sedimentos observados em campo para a bacia RB-01.



**Figura 17:** Produção de sedimentos estimados pela MUSLE com os coeficientes originais e produção de sedimentos observados em campo para a bacia RB-10.



**Figura 18:** Produção de sedimentos estimados pela MUSLE com os coeficientes originais e produção de sedimentos observados em campo para a bacia RB-11.



**Figura 19:** Produção de sedimentos estimados pela MUSLE com os coeficientes originais e produção de sedimentos observados em campo para as três bacias.

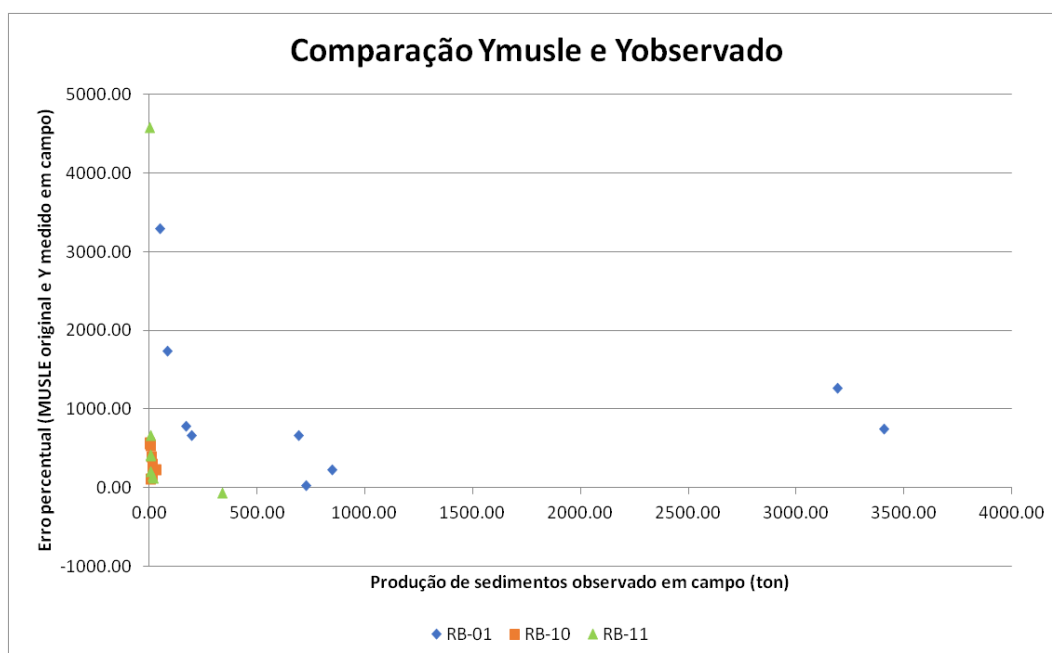
**Tabela 16:** Erro percentual da produção de sedimentos esperada pela aplicação da MUSLE com os coeficientes originais em relação à observada em campo.

Bacia	Evento	Q (m³)	qp (m³/s)	Y MUSLE (ton)	Y observado (ton)	erro (%)
RB-01	Evento 1	8,46 x 10 <sup>5</sup>	10,21	940,07	725,64	29,55
	Evento 5	2,47 x 10 <sup>6</sup>	23,74	2747,04	846,11	224,67
	Evento 18	3,54 x 10 <sup>6</sup>	52,99	5269,69	688,73	665,13
	Evento 22	2,21 x 10 <sup>7</sup>	368,71	43549,51	3190,70	1264,89
	Evento 23	1,05 x 10 <sup>6</sup>	18,18	1467,73	193,10	660,07
	Evento 24	1,03 x 10 <sup>6</sup>	19,28	1500,35	169,16	786,93
	Evento 28	4,55 x 10 <sup>5</sup>	5,55	1500,35	81,84	1733,28
	Evento 29	1,49 x 10 <sup>7</sup>	260,39	28757,11	3404,28	744,73
	Evento 33	6,48 x 10 <sup>4</sup>	0,92	58,13	14,36	304,76
Evento 37	4,30 x 10 <sup>5</sup>	8,16	1579,87	46,53	3295,21	
RB-10	Evento 2_B1	1,25 x 10 <sup>4</sup>	0,47	4,58	2,13	115,46
	Evento 4_B1	5,22 x 10 <sup>4</sup>	0,39	9,22	1,41	553,70
	Evento 6_B1	4,70 x 10 <sup>4</sup>	0,65	11,56	1,73	568,34
	Evento 11_B1	1,11 x 10 <sup>5</sup>	2,54	40,11	12,61	218,10
	Evento 13_B1	5,04 x 10 <sup>4</sup>	2,58	26,02	10,94	137,91
	Evento 14_B1	1,34 x 10 <sup>5</sup>	2,88	47,96	11,89	303,40
	Evento 36_B1	1,80 x 10 <sup>5</sup>	7,66	97,53	30,07	224,37
	Evento 38_B1	1,26 x 10 <sup>5</sup>	2,55	43,13	8,75	392,82
	Evento 1_B2	6,86 x 10 <sup>4</sup>	1,73	24,70	3,81	548,55
Evento 5_B2	7,65 x 10 <sup>4</sup>	1,01	19,49	3,07	534,11	
RB-11	Evento 4	1,90 x 10 <sup>6</sup>	0,30	46,87	1,00	4586,24

Evento 5	$1,14 \times 10^5$	1,78	26,55	10,87	144,37
Evento 6	$8,06 \times 10^4$	1,24	17,84	5,91	201,58
Evento 24	$1,12 \times 10^5$	4,12	42,08	18,48	127,67
Evento 28	$5,22 \times 10^4$	1,15	13,40	2,66	402,89
Evento 29	$1,03 \times 10^5$	1,05	18,69	2,43	667,49
Evento 1 - B2	$5,96 \times 10^4$	1,05	13,77	2,66	418,20
Evento 2 - B2	$3,66 \times 10^5$	8,56	122,99	337,66	-63,57

A aproximação do modelo com os coeficientes originais apresentou diferenças entre o medido em campo e o esperado com erros entre 4586% e -63,57%, considerando todas as bacias. Para a bacia RB-01, os erros ficaram entre 29,55% e 3295,21%. Para a bacia RB-10, o erro da estimativa do modelo ficou entre 115,46% e 568,34%. Para a bacia RB-11, o erro ficou entre -63,57% e 4586,24%.

Observa-se que os coeficientes originais do modelo causam uma superestimativa da produção de sedimentos para a bacia e suas sub-bacias para todos eventos, à exceção do Evento 2\_B2 da bacia RB-11, que apresentou o maior valor para a concentração de sólidos suspensos em todo o hidrossedimentograma no período em estudo.



**Figura 20:** Produção de sedimentos estimados pela MUSLE com os coeficientes originais e produção de sedimentos observados em campo para as três bacias.

A análise da Figura 20 permite observar que uma alta dispersão da produção de sedimentos medida e observada em campo em relação à

aplicação da MUSLE com os coeficientes originais, sendo as maiores dispersões principalmente nos eventos de baixa magnitude.

### 5.3.2. Calibração e Validação dos Parâmetros $\alpha$ e $\beta$

A calibração dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  foi realizada através da aplicação do software Microsoft Excel e de seu ferramental gráfico através da obtenção de uma linha de tendência do tipo potência referente ao gráfico de  $(Q \cdot qp)$  x  $(Y/KLSCP)$ , para cada bacia e para as três bacias em conjunto. Através da utilização desta rotina foram obtidos os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  que melhor expressam a simulação dos eventos selecionados, resumidos na Tabela 17 e verificados nas Figura 21, Figura 22, Figura 23 e Figura 24.

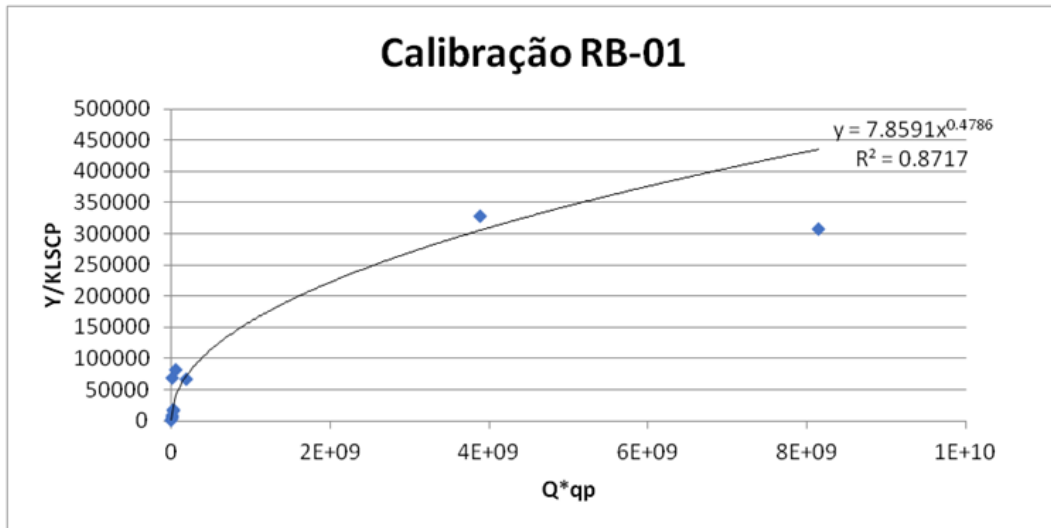
**Tabela 17:** Coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  obtidos para cada bacia e para as bacias juntas

	Calibração		
	$\alpha$	$\beta$	R <sup>2</sup>
<b>RB-01</b>	7,86	0,48	0,87
<b>RB-10</b>	2,30	0,58	0,82
<b>RB-11</b>	0,02	0,97	0,53
<b>3 bacias</b>	5,00	0,51	0,82

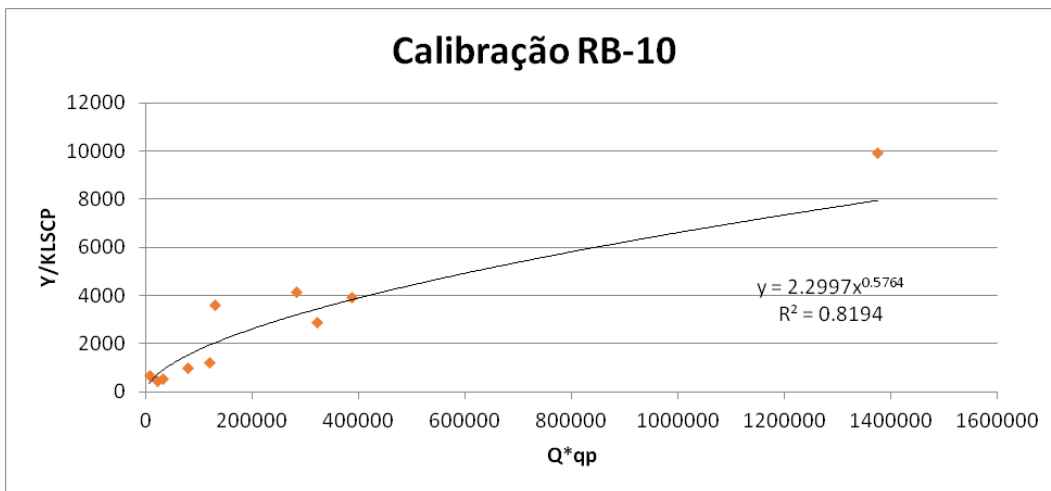
Observa-se que R<sup>2</sup>, o coeficiente de determinação, varia entre 0,53 e 0,87, sendo que calibração da bacia RB-11 (que resultou no menor valor de 0,53) inclui o Evento 2\_B2, o evento mais expressivo do sedimentograma. No gráfico da Figura 23, observa-se que esse evento encontra-se isolado no contexto do conjunto dos eventos que compõe a calibração da bacia RB-11, o que explica a dispersão ocorrida.

É notável a discrepância entre os valores originais dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  da equação em relação aos calibrados para a bacia do Rio dos Bugres. Os valores obtidos na calibração para os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  são significativamente diferentes dos valores da MUSLE original ( $\alpha$  de 11,8 e  $\beta$  de 0,56) e dos valores calibrados por Avanzi *et al.* (2007) ( $\alpha$  de 14,96 e  $\beta$  de 0,59), e por Silva *et al.* (2011) ( $\alpha$  de 3,19 e  $\beta$  de 0,56). Os parâmetros  $\alpha$  obtidos na calibração do Rio dos Bugres tem alta variação (entre 0,02 e 7,86) e se aproximam do valor calibrado por Silva *et al.* (2011). Os coeficientes  $\beta$  calibrados são aqueles que mais se aproximam do valor original da MUSLE, à exceção do  $\beta$  obtido na

bacia menor RB-11. Nesse caso,  $\beta$  de 0,97 aproxima a curva de ajuste à linearidade, representando fisicamente que, mesmo para diferentes magnitudes de eventos, a bacia RB-11 retorna efeitos similares de produção de sedimentos.

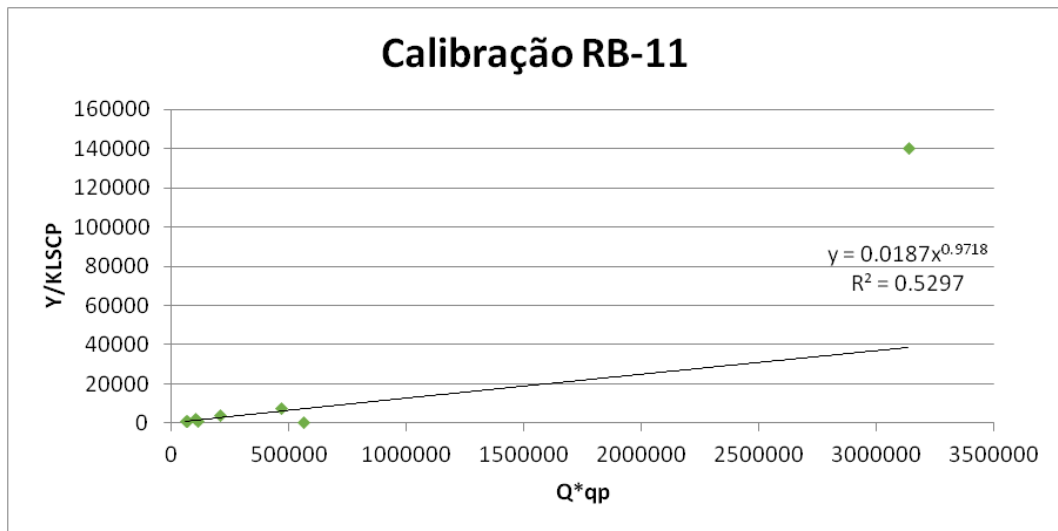


**Figura 21:** Dispersão dos fatores (Q x qp) e (Y/KLSCP) na bacia RB-01

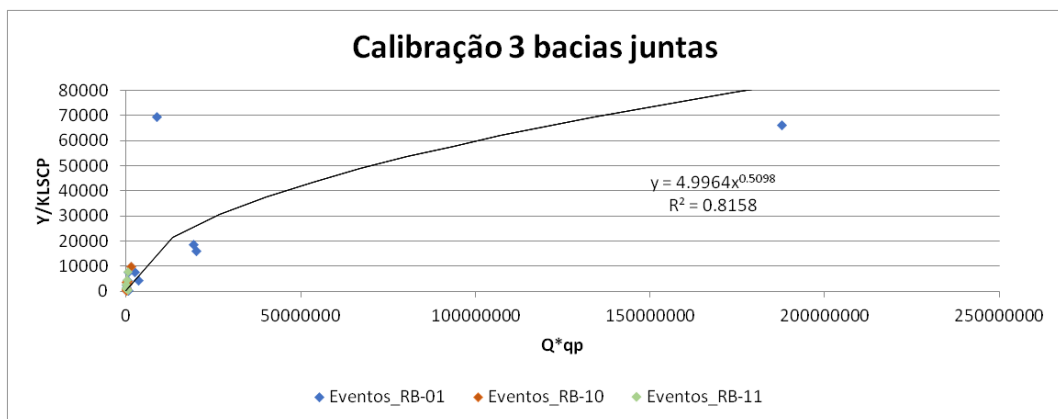


**Figura 22:** Dispersão dos fatores (Q x qp) e (Y/KLSCP) na bacia RB-10





**Figura 23:** Dispersão dos fatores (Q x qp) e (Y/KLSCP) na bacia RB-11



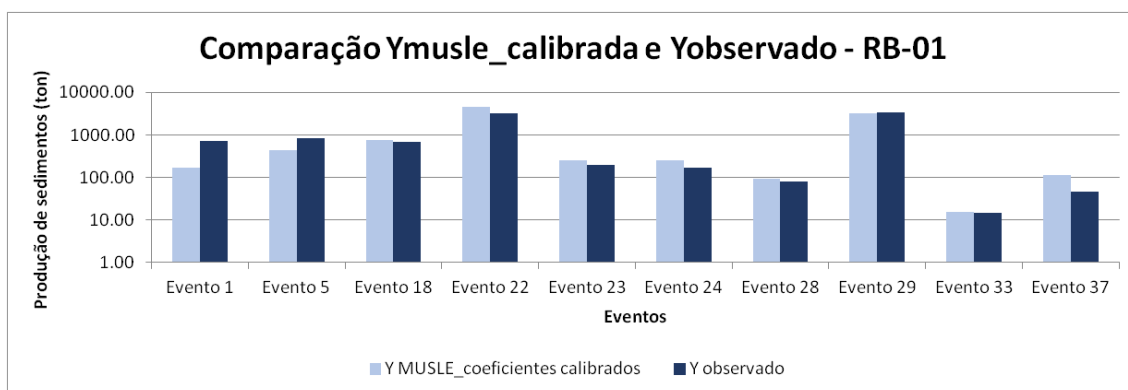
**Figura 24:** Dispersão dos fatores (Q x qp) e (Y/KLSCP) no conjunto formado por todos eventos nas 3 bacias

### 5.3.3. Equação MUSLE Calibrada

A estimativa da produção de sedimentos para a bacia do Rio dos Bugres calculada pela equação MUSLE usando os coeficientes calibrados foi comparada com os dados medidos em campo, para a bacia RB-01, para a bacia RB-10, para a bacia RB-11 e para as três bacias juntas. Como forma de associar a melhor aproximação do modelo calibrado às magnitudes dos eventos, foi feita a análise do erro percentual em relação ao medido e observado em campo, em cada evento individual levado em consideração neste estudo. Observa-se que, como esperado pela aplicação da calibração, a produção de sedimentos calculada pelo modelo calibrado se aproximou melhor da produção de sedimentos observada em campo, em comparação ao atingido

pelo modelo sem calibração calculado usando os coeficientes originais da MUSLE.

A comparação do modelo calibrado para a bacia RB-01 em relação ao observado em campo encontra-se na Figura 25 e o erro associado a cada evento individual na Tabela 18.



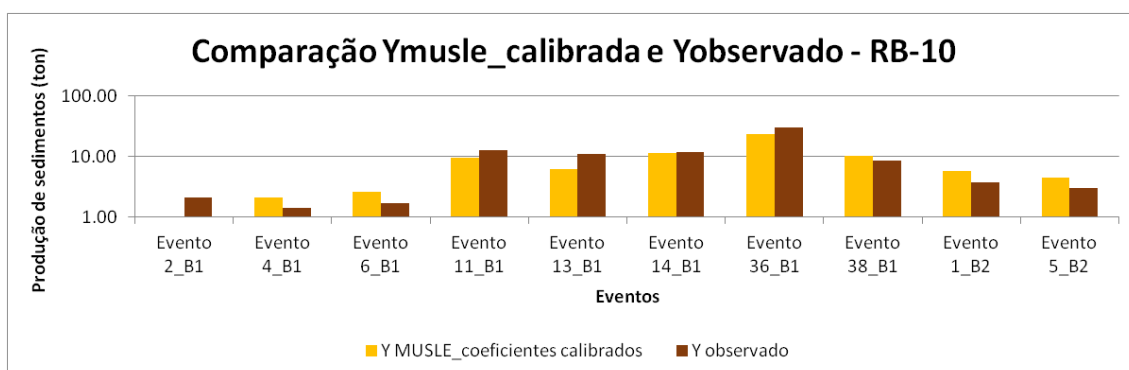
**Figura 25:** Produção de sedimentos estimados pela MUSLE com os coeficientes calibrados para a bacia RB-01 e produção de sedimentos observados em campo.

Para a bacia RB-01, ouve variação da produção de sedimentos esperada pelo modelo calibrado, com erros entre -76,49% a 138,25%, ou seja, o modelo calibrado tanto subestima quanto superestima a produção de sedimentos real. Os Evento 18, Evento 29 e Evento 33 são os eventos que apresentaram melhor ajuste, se aproximando melhor do modelo calibrado, com erro associado de cerca de 10%.

**Tabela 18:** Erro percentual da produção de sedimentos esperada pela aplicação da MUSLE com os coeficientes calibrados em relação à observada em campo, bacia RB-01.

	Q (m <sup>3</sup> )	qp (m <sup>3</sup> /s)	Y observado (ton)	Y calibrado (ton)	erro (%)
<b>Evento 1</b>	8,46 x 10 <sup>5</sup>	10,21	725,64	170,62	-76,49
<b>Evento 5</b>	2,47 x 10 <sup>6</sup>	23,74	846,11	426,62	-49,58
<b>Evento 18</b>	3,54 x 10 <sup>6</sup>	52,99	688,73	744,46	8,09
<b>Evento 22</b>	2,21 x 10 <sup>7</sup>	368,71	3190,70	4526,04	41,85
<b>Evento 23</b>	1,05 x 10 <sup>6</sup>	18,18	193,10	249,69	29,30
<b>Evento 24</b>	1,03 x 10 <sup>6</sup>	19,28	169,16	254,42	50,40
<b>Evento 28</b>	4,55 x 10 <sup>5</sup>	5,55	81,84	94,72	15,74
<b>Evento 29</b>	1,49 x 10 <sup>7</sup>	260,39	3404,28	3174,53	-6,75
<b>Evento 33</b>	6,48 x 10 <sup>4</sup>	0,92	14,36	15,81	10,10
<b>Evento 37</b>	4,30 x 10 <sup>5</sup>	8,16	46,53	110,86	138,25

A comparação do modelo calibrado para a bacia RB-10 em relação ao observado em campo encontra-se na Figura 26 e o erro associado a cada evento individual na Tabela 19.



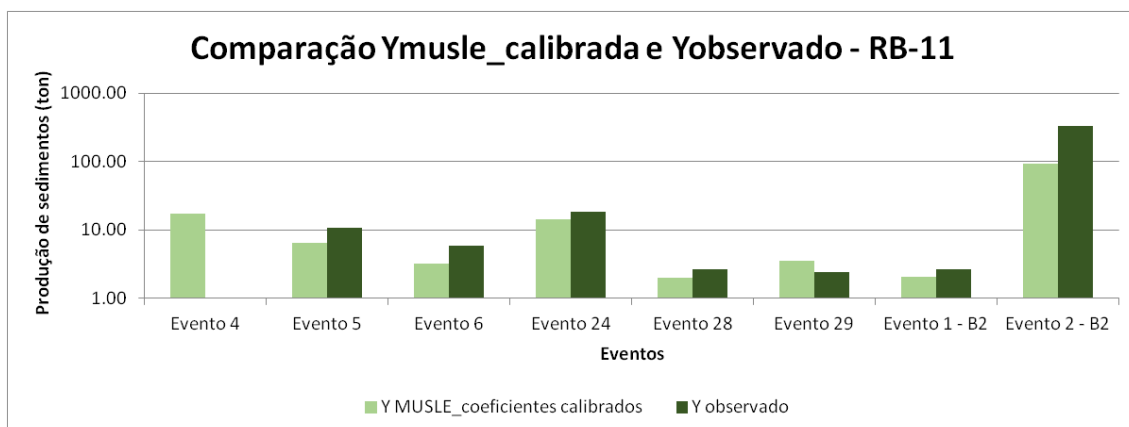
**Figura 26:** Produção de sedimentos estimados pela MUSLE com os coeficientes calibrados e produção de sedimentos observados em campo na bacia RB-10.

**Tabela 19:** Erro percentual da produção de sedimentos esperada pela aplicação da MUSLE com os coeficientes calibrados em relação à observada em campo, bacia RB-10.

	Q (m <sup>3</sup> )	qp (m <sup>3</sup> /s)	Y observado (ton)	Y calibrado (ton)	erro (%)
<b>Evento 2_B1</b>	1,25 x 10 <sup>4</sup>	0,47	2,13	1,03	-51,59
<b>Evento 4_B1</b>	5,22 x 10 <sup>4</sup>	0,39	1,41	2,11	49,91
<b>Evento 6_B1</b>	4,70 x 10 <sup>4</sup>	0,65	1,73	2,67	54,28
<b>Evento 11_B1</b>	1,11 x 10 <sup>5</sup>	2,54	12,61	9,60	-23,84
<b>Evento 13_B1</b>	5,04 x 10 <sup>4</sup>	2,58	10,94	6,15	-43,76
<b>Evento 14_B1</b>	1,34 x 10 <sup>5</sup>	2,88	11,89	11,54	-2,91
<b>Evento 36_B1</b>	1,80 x 10 <sup>5</sup>	7,66	30,07	23,97	-20,29
<b>Evento 38_B1</b>	1,26 x 10 <sup>5</sup>	2,55	8,75	10,35	18,24
<b>Evento 1_B2</b>	6,86 x 10 <sup>4</sup>	1,73	3,81	5,83	53,08
<b>Evento 5_B2</b>	7,65 x 10 <sup>4</sup>	1,01	3,07	4,57	48,64

Para a bacia RB-10, houve variação da produção de sedimentos esperada pelo modelo calibrado com erros entre -51,59% a 54,28%, com o modelo calibrado subestimando e superestimando a produção de sedimentos real. O Evento 14\_B1 foi o que apresentou melhor ajuste, se aproximando melhor do modelo calibrado, com erro associado de cerca de 3%.

A comparação do modelo calibrado para a bacia RB-11 em relação ao observado em campo encontra-se na Figura 27 e o erro associado a cada evento individual na Tabela 20.



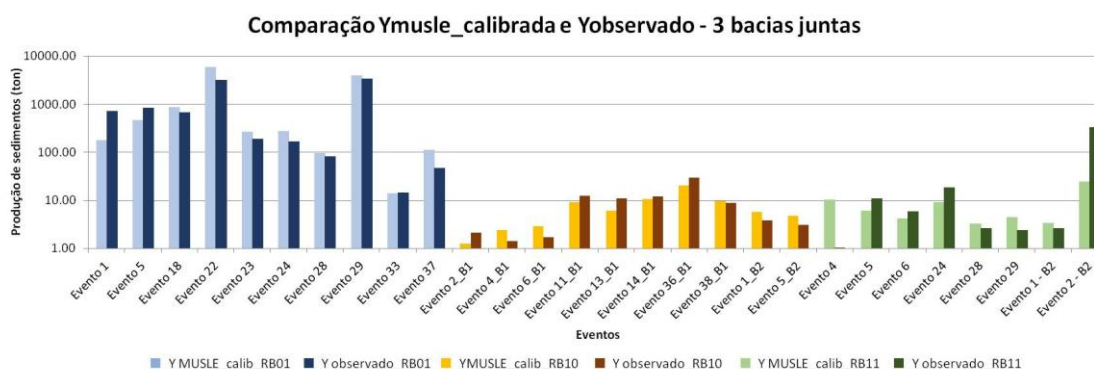
**Figura 27:** Produção de sedimentos estimados pela MUSLE com os coeficientes calibrados e produção de sedimentos observados em campo na bacia RB-11.

**Tabela 20:** Erro percentual da produção de sedimentos esperada pela aplicação da MUSLE com os coeficientes calibrados em relação à observada em campo, bacia RB-11.

	Q (m <sup>3</sup> )	qp (m <sup>3</sup> /s)	Y observado (ton)	Y calibrado (ton)	erro (%)
<b>Evento 4</b>	1,90 x 10 <sup>6</sup>	0,30	1,00	17,30	1629,38
<b>Evento 5</b>	1,14 x 10 <sup>5</sup>	1,78	10,87	6,45	-40,62
<b>Evento 6</b>	8,06 x 10 <sup>4</sup>	1,24	5,91	3,23	-45,31
<b>Evento 24</b>	1,12 x 10 <sup>5</sup>	4,12	18,48	14,35	-22,39
<b>Evento 28</b>	5,22 x 10 <sup>4</sup>	1,15	2,66	1,97	-26,11
<b>Evento 29</b>	1,03 x 10 <sup>5</sup>	1,05	2,43	3,51	44,03
<b>Evento 1 - B2</b>	5,96 x 10 <sup>4</sup>	1,05	2,66	2,06	-22,33
<b>Evento 2 - B2</b>	3,66 x 10 <sup>5</sup>	8,56	337,66	92,26	-72,68

Para a bacia RB-11, individualmente, os eventos apresentaram uma alta dispersão com erros entre -72,68% a 1629,38%, com o modelo calibrado subestimando (valores negativos) e superestimando (valores positivos) a produção de sedimentos real. O evento individual que apresentou melhor ajuste foi o Evento 1-B2 que se aproximou melhor do modelo calibrado, com erro associado de cerca de -22,33%.

A comparação do modelo calibrado para todas as bacias juntas em relação ao observado em campo encontra-se na Figura 27 e o erro associado a cada evento individual na Tabela 20.



**Figura 28:** Produção de sedimentos estimados pela MUSLE com os coeficientes calibrados para as três bacias e produção de sedimentos observados em campo no conjunto de todos eventos.

**Tabela 21:** Erro percentual da produção de sedimentos esperada pela aplicação da MUSLE com os coeficientes calibrados em relação à observada em campo, para as três bacias.

	Q (m <sup>3</sup> )	qp (m <sup>3</sup> /s)	Y observado (ton)	Y calibrado (ton)	erro (%)	
RB-01	Evento 1	8,46 x 10 <sup>5</sup>	10,21	725,64	178,54	-75,40
	Evento 5	2,47 x 10 <sup>6</sup>	23,74	846,11	473,90	-43,99
	Evento 18	3,54 x 10 <sup>6</sup>	52,99	688,73	857,53	24,51
	Evento 22	2,21 x 10 <sup>7</sup>	368,71	3190,70	5864,44	83,80
	Evento 23	1,05 x 10 <sup>6</sup>	18,18	193,10	267,84	38,70
	Evento 24	1,03 x 10 <sup>6</sup>	19,28	169,16	273,25	61,53
	Evento 28	4,55 x 10 <sup>5</sup>	5,55	81,84	95,38	16,55
	Evento 29	1,49 x 10 <sup>7</sup>	260,39	3404,28	4019,25	18,06
	Evento 33	6,48 x 10 <sup>4</sup>	0,92	14,36	14,17	-1,34
Evento 37	4,30 x 10 <sup>5</sup>	8,16	46,53	112,79	142,39	
RB-10	Evento 2_B1	1,25 x 10 <sup>4</sup>	0,47	2,13	1,26	-40,97
	Evento 4_B1	5,22 x 10 <sup>4</sup>	0,39	1,41	2,37	68,21
	Evento 6_B1	4,70 x 10 <sup>4</sup>	0,65	1,73	2,91	68,53
	Evento 11_B1	1,11 x 10 <sup>5</sup>	2,54	12,61	9,05	-28,25
	Evento 13_B1	5,04 x 10 <sup>4</sup>	2,58	10,94	6,10	-44,22
	Evento 14_B1	1,34 x 10 <sup>5</sup>	2,88	11,89	10,65	-10,46
	Evento 36_B1	1,80 x 10 <sup>5</sup>	7,66	30,07	20,31	-32,44
	Evento 38_B1	1,26 x 10 <sup>5</sup>	2,55	8,75	9,66	10,43
	Evento 1_B2	6,86 x 10 <sup>4</sup>	1,73	3,81	5,82	52,77
Evento 5_B2	7,65 x 10 <sup>4</sup>	1,01	3,07	4,69	52,58	
RB-11	Evento 4	1,90 x 10 <sup>6</sup>	0,30	1,00	10,21	921,04
	Evento 5	1,14 x 10 <sup>5</sup>	1,78	10,87	6,09	-43,97
	Evento 6	8,06 x 10 <sup>4</sup>	1,24	5,91	4,24	-28,35
	Evento 24	1,12 x 10 <sup>5</sup>	4,12	18,48	9,26	-49,91
	Evento 28	5,22 x 10 <sup>4</sup>	1,15	2,66	3,27	22,59
	Evento 29	1,03 x 10 <sup>5</sup>	1,05	2,43	4,42	81,59
	Evento 1 - B2	5,96 x 10 <sup>4</sup>	1,05	2,66	3,35	26,01
	Evento 2 - B2	3,66 x 10 <sup>5</sup>	8,56	337,66	24,58	-92,72

Considerando a calibração para os eventos de todas as bacias juntas, houve uma alta dispersão entre o medido e o calculado pelo modelo calibrado, com módulo de erro percentual entre 1,34% (Evento 33 na RB-01) e 921,04%

(Evento 4 na RB-11), indicando que o modelo não é capaz de capturar todas as diferenças físicas existentes na área. Ambos eventos tiveram vazão de pico associada de baixa magnitude (de 0,92 m<sup>3</sup>/s e 0,30 m<sup>3</sup>/s), o Evento 4 relacionado à bacia de cabeceira RB-11. Esses resultados evidenciam a dificuldade na representação da produção de sedimentos, pois mesmo com a aproximação do modelo aos valores observados em campo, observa-se que os erros ainda são altos.

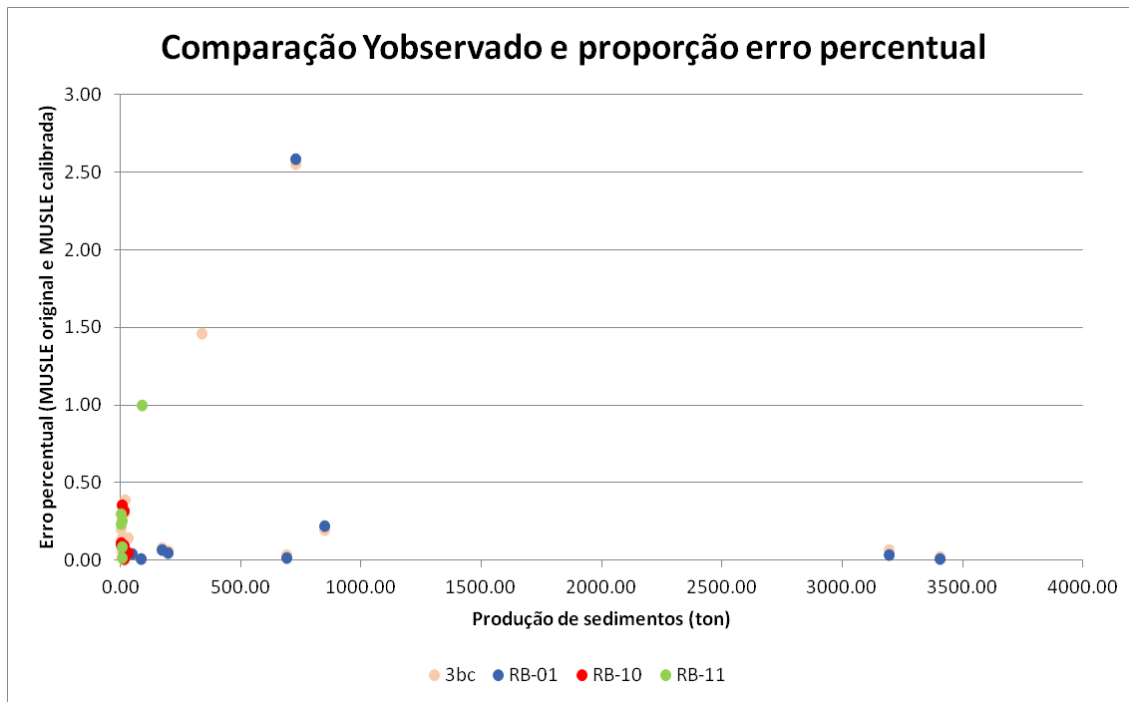
A proporção do erro obtido com o modelo calibrado sobre o erro obtido com o modelo original não calibrado, encontrada na Tabela 22, evidencia uma melhora muito significativa no modelo calibrado, apresentando resultados com erro entre 2 e 1000 vezes menor. Os valores obtidos para a produção de sedimentos com o ajuste dos coeficientes na calibração indicam uma maior precisão em relação à MUSLE com os coeficientes  $\alpha$  de 11,8 e  $\beta$  de 0,56. Dentre todos os eventos, apenas dois apresentaram um erro relativo superior ao da MUSLE com os coeficientes originais, o Evento 1 da bacia RB-01 e o Evento 2\_B2 da bacia RB-11. Na calibração para as bacias separadas, o Evento 1 da bacia RB-01 passa de um erro de 29,55% (MUSLE original) para -76,49% (MUSLE calibrada) e o Evento 2\_B2 da bacia RB-11 passa de um erro de -63,57% (MUSLE original) para -72,68% (MUSLE calibrada). Já na calibração das três bacias em conjunto, o Evento 1 vai de um erro de 29,55% (MUSLE original) para -75,40% (MUSLE calibrada) enquanto o erro associado ao Evento 2\_B2 passa de -63,57% para -92,72%. Os eventos Evento 1 da bacia RB-01 e Evento 2\_B2 da bacia RB-11, são os eventos que mais se aproximaram na MUSLE original, e por esse motivo acabam se diferenciando da tendência de todos os outros eventos modelados na série.

**Tabela 22:** Comparação dos erros percentuais nos eventos individuais da calibração, em ordem crescente de proporção entre erros, em valores absolutos.

Bacia	Evento	Y observado (ton)	erro (%) MUSLE original	erro (%) MUSLE calibrada	proporção entre o erro da MUSLE calibrada e o erro da MUSLE original
<b>3bc</b>	Evento 33	14,36	304,76	-1,34	0,00
<b>RB-01</b>	Evento 29	3404,28	744,73	-6,75	0,01
<b>RB-01</b>	Evento 28	81,84	1733,28	15,74	0,01
<b>3bc</b>	Evento 28	81,84	1733,28	16,55	0,01
<b>RB-10</b>	Evento 14_B1	11,89	303,40	-2,91	0,01
<b>RB-01</b>	Evento 18	688,73	665,13	8,09	0,01
<b>3bc</b>	Evento 29	3404,28	744,73	18,06	0,02
<b>3bc</b>	Evento 38_B1	8,75	392,82	10,43	0,03

<b>RB-01</b>	Evento 22	3190,70	1264,89	41,85	0,03
<b>RB-01</b>	Evento 33	14,36	304,76	10,10	0,03
<b>3bc</b>	Evento 14_B1	11,89	303,40	-10,46	0,03
<b>3bc</b>	Evento 18	688,73	665,13	24,51	0,04
<b>RB-01</b>	Evento 37	46,53	3295,21	138,25	0,04
<b>3bc</b>	Evento 37	46,53	3295,21	142,39	0,04
<b>RB-01</b>	Evento 23	193,10	660,07	29,30	0,04
<b>RB-10</b>	Evento 38_B1	8,75	392,82	18,24	0,05
<b>RB-11</b>	Evento 1 - B2	2,66	418,20	-22,33	0,05
<b>3bc</b>	Evento 28	2,66	402,89	22,59	0,06
<b>3bc</b>	Evento 23	193,10	660,07	38,70	0,06
<b>3bc</b>	Evento 1 - B2	2,66	418,20	26,01	0,06
<b>RB-01</b>	Evento 24	169,16	786,93	50,40	0,06
<b>RB-11</b>	Evento 28	2,66	402,89	-26,11	0,06
<b>RB-11</b>	Evento 29	2,43	667,49	44,03	0,07
<b>3bc</b>	Evento 22	3190,70	1264,89	83,80	0,07
<b>3bc</b>	Evento 24	169,16	786,93	61,53	0,08
<b>RB-10</b>	Evento 4_B1	1,41	553,70	49,91	0,09
<b>RB-10</b>	Evento 36_B1	30,07	224,37	-20,29	0,09
<b>RB-10</b>	Evento 5_B2	3,07	534,11	48,64	0,09
<b>RB-10</b>	Evento 6_B1	1,73	568,34	54,28	0,10
<b>3bc</b>	Evento 1_B2	3,81	548,55	52,77	0,10
<b>RB-10</b>	Evento 1_B2	3,81	548,55	53,08	0,10
<b>3bc</b>	Evento 5_B2	3,07	534,11	52,58	0,10
<b>RB-10</b>	Evento 11_B1	12,61	218,10	-23,84	0,11
<b>3bc</b>	Evento 6_B1	1,73	568,34	68,53	0,12
<b>3bc</b>	Evento 29	2,43	667,49	81,59	0,12
<b>3bc</b>	Evento 4_B1	1,41	553,70	68,21	0,12
<b>3bc</b>	Evento 11_B1	12,61	218,10	-28,25	0,13
<b>3bc</b>	Evento 6	5,91	201,58	-28,35	0,14
<b>3bc</b>	Evento 36_B1	30,07	224,37	-32,44	0,14
<b>RB-11</b>	Evento 24	18,48	127,67	-22,39	0,18
<b>3bc</b>	Evento 5	846,11	224,67	-43,99	0,20
<b>3bc</b>	Evento 4	1,00	4586,24	921,04	0,20
<b>RB-01</b>	Evento 5	846,11	224,67	-49,58	0,22
<b>RB-11</b>	Evento 6	5,91	201,58	-45,31	0,22
<b>RB-11</b>	Evento 5	10,87	144,37	-40,62	0,28
<b>3bc</b>	Evento 5	10,87	144,37	-43,97	0,30
<b>RB-10</b>	Evento 13_B1	10,94	137,91	-43,76	0,32
<b>3bc</b>	Evento 13_B1	10,94	137,91	-44,22	0,32
<b>3bc</b>	Evento 2_B1	2,13	115,46	-40,97	0,35
<b>RB-11</b>	Evento 4	1,00	4586,24	1629,38	0,36
<b>3bc</b>	Evento 24	18,48	127,67	-49,91	0,39
<b>RB-10</b>	Evento 2_B1	2,13	115,46	-51,59	0,45
<b>RB-11</b>	Evento 2 - B2	337,66	-63,57	-72,68	1,14
<b>3bc</b>	Evento 2 - B2	337,66	-63,57	-92,72	1,46
<b>3bc</b>	Evento 1	725,64	29,55	-75,40	2,55
<b>RB-01</b>	Evento 1	725,64	29,55	-76,49	2,59

Na Figura 29 evidencia-se uma tendência de eventos de maior porte retornando erros menores do que os eventos de baixa magnitude.



**Figura 29:** Comparação entre o erro percentual da relação produção de sedimentos MUSLE com os coeficientes calibrados e produção de sedimentos observados em campo, nos eventos individuais para as bacias analisadas individualmente e para as três em conjunto.

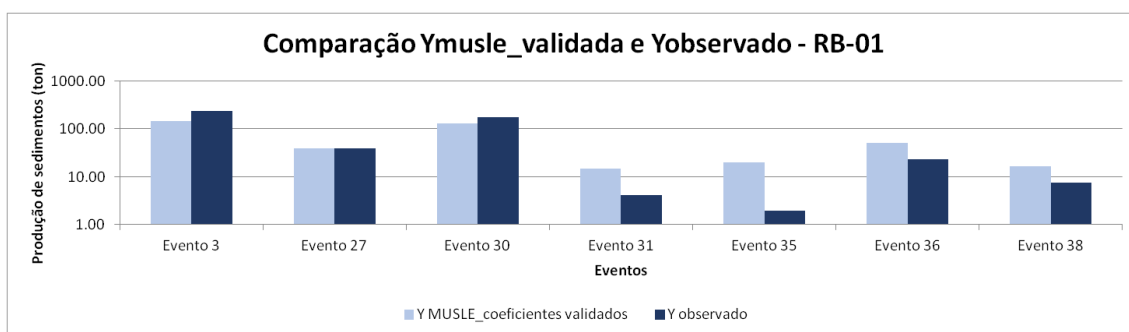
Assim, de modo geral, admite-se que houve uma maior aproximação entre o modelo calibrado e o observado, como previsto pela aplicação da metodologia, à exceção de dois eventos, que se aproximaram mais da equação MUSLE não calibrada: o Evento 1 que aparenta ser um acaso da aproximação da curva e o evento extremo mencionado no item anterior, o Evento 2\_B2, que excedeu todas as observações de concentração de sólidos suspensos na amostragem.

#### 5.3.4. Equação MUSLE Validada

A estimativa da produção de sedimentos para a bacia do Rio dos Bugres calculada pela equação MUSLE usando os coeficientes da calibração, e usando os eventos separados para a validação, foi comparada com os dados medidos em campo, para a bacia RB-01 (Figura 30), para a bacia RB-10 (Figura 31), para a bacia RB-11 (Figura 32) e para as três bacias juntas (Figura 33). A análise do erro percentual da produção de sedimentos aproximada pela MUSLE com os coeficientes calibrados, em relação ao medido e observado em



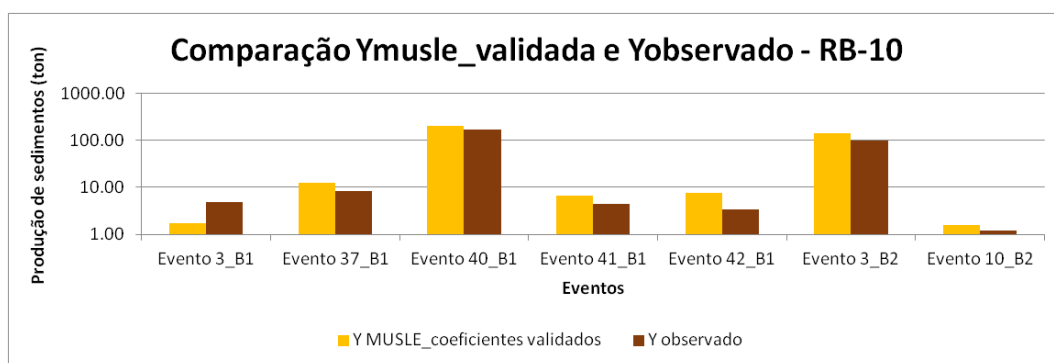
campo, em cada evento individual levado em consideração neste estudo, encontra-se na Tabela 23, Tabela 24, Tabela 25 e Tabela 26.



**Figura 30:** Produção de sedimentos estimados pela MUSLE calibrada na validação para a bacia RB-01 e produção de sedimentos observados em campo.

**Tabela 23:** Erro percentual da produção de sedimentos esperada pela aplicação da MUSLE com os coeficientes calibrados em relação à observada em campo, validação da bacia RB-01

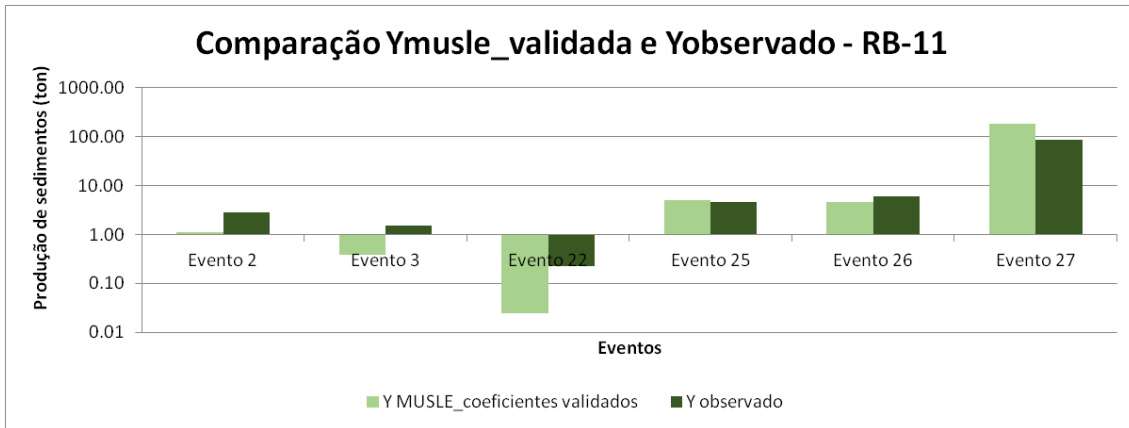
	Q (m³)	qp (m³/s)	Y observado (ton)	Y validado (ton)	erro (%)
<b>Evento 3</b>	6,61 x 10 <sup>5</sup>	9,17	237,37	144,10	-39,29
<b>Evento 27</b>	1,69 x 10 <sup>5</sup>	2,30	38,52	38,67	0,37
<b>Evento 30</b>	5,15 x 10 <sup>5</sup>	9,30	173,57	128,66	-25,87
<b>Evento 31</b>	8,59 x 10 <sup>4</sup>	0,58	4,06	14,49	256,48
<b>Evento 35</b>	1,69 x 10 <sup>5</sup>	0,60	1,92	20,24	953,01
<b>Evento 36</b>	1,79 x 10 <sup>5</sup>	3,92	23,48	51,38	118,78
<b>Evento 38</b>	7,12 x 10 <sup>4</sup>	0,91	7,44	16,45	120,94



**Figura 31:** Produção de sedimentos estimados pela MUSLE calibrada na validação e produção de sedimentos observados em campo na bacia RB-10.

**Tabela 24:** Erro percentual da produção de sedimentos esperada pela aplicação da MUSLE com os coeficientes calibrados em relação à observada em campo, validação da bacia RB-10.

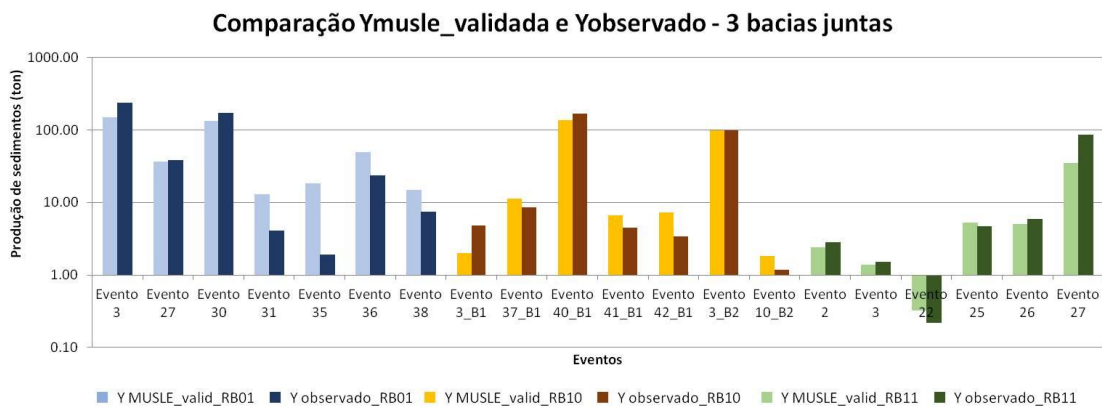
	Q (m³)	qp (m³/s)	Y observado (ton)	Y validado (ton)	erro (%)
<b>Evento 3_B1</b>	2.16 x 10 <sup>4</sup>	0,67	4,77	1,73	-63,74
<b>Evento 37_B1</b>	1.03 x 10 <sup>5</sup>	4,23	8,49	12,34	45,34
<b>Evento 40_B1</b>	1.31 x 10 <sup>6</sup>	43,47	167,42	205,32	22,64
<b>Evento 41_B1</b>	7.98 x 10 <sup>4</sup>	1,93	4,48	6,79	51,75
<b>Evento 42_B1</b>	9.01 x 10 <sup>4</sup>	2,04	3,44	7,52	118,59
<b>Evento 3_B2</b>	9.03 x 10 <sup>5</sup>	33,80	99,33	143,05	44,01
<b>Evento 10_B2</b>	1.66 x 10 <sup>4</sup>	0,75	1,18	1,59	34,72



**Figura 32:** Produção de sedimentos estimados pela MUSLE c calibrada na validação e produção de sedimentos observados em campo na bacia RB-11.

**Tabela 25:** Erro percentual da produção de sedimentos esperada pela aplicação da MUSLE com os coeficientes calibrados em relação à observada em campo, validação da bacia RB-11.

	Q (m <sup>3</sup> )	qp (m <sup>3</sup> /s)	Y observado (ton)	Y validado (ton)	erro (%)
<b>Evento 2</b>	8,79 x 10 <sup>4</sup>	0,38	2,85	1,12	-60,56
<b>Evento 3</b>	3,20 x 10 <sup>4</sup>	0,35	1,51	0,39	-74,27
<b>Evento 22</b>	7,77 x 10 <sup>3</sup>	0,09	0,22	0,02	-88,94
<b>Evento 25</b>	6,05 x 10 <sup>4</sup>	2,54	4,67	4,93	5,69
<b>Evento 26</b>	8,30 x 10 <sup>4</sup>	1,71	5,94	4,57	-23,20
<b>Evento 27</b>	4,38 x 10 <sup>5</sup>	14,35	85,19	181,29	112,80



**Figura 33:** Produção de sedimentos estimados pela MUSLE com os coeficientes da validação para as três bacias e produção de sedimentos observados em campo no conjunto de todos eventos.

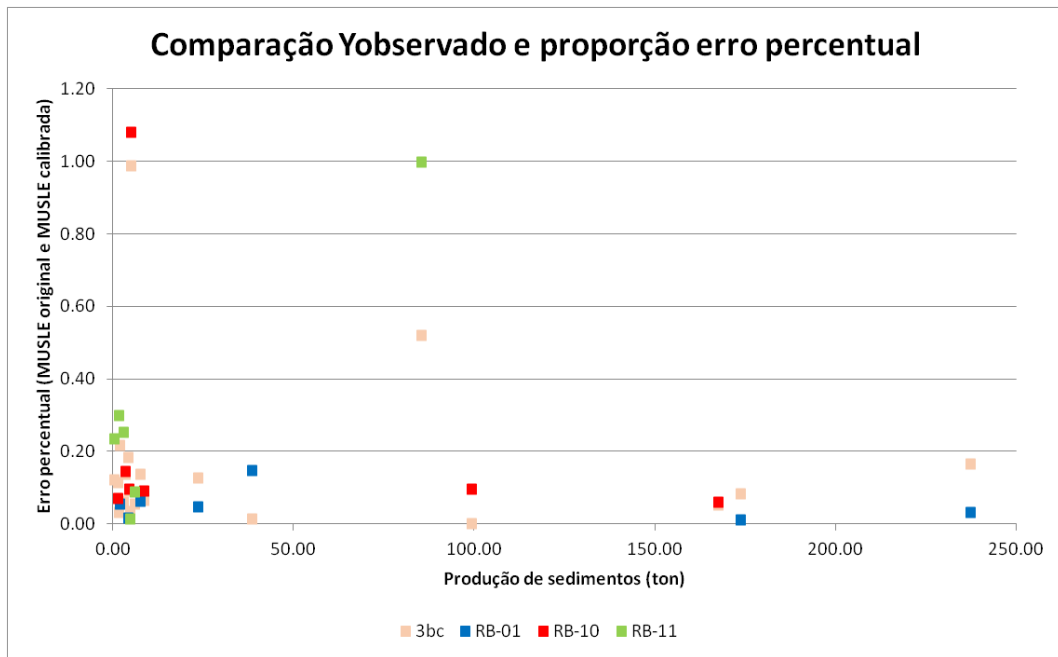
**Tabela 26:** Erro percentual da produção de sedimentos esperada pela aplicação da MUSLE com os coeficientes da validação em relação à observada em campo, para as três bacias.

		Q (m <sup>3</sup> )	qp (m <sup>3</sup> /s)	Y observado (ton)	Y validado (ton)	erro (%)
RB-01	Evento 3	6,61 x 10 <sup>5</sup>	9,17	237,37	149,13	-37,17
	Evento 27	1,69 x 10 <sup>5</sup>	2,30	38,52	36,73	-4,66
	Evento 30	5,15 x 10 <sup>5</sup>	9,30	173,57	132,18	-23,85
	Evento 31	8,59 x 10 <sup>4</sup>	0,58	4,06	12,91	217,62
	Evento 35	1,69 x 10 <sup>5</sup>	0,60	1,92	18,43	858,90
	Evento 36	1,79 x 10 <sup>5</sup>	3,92	23,48	49,71	111,71
	Evento 38	7,12 x 10 <sup>4</sup>	0,91	7,44	14,78	98,50
	Evento 3_B1	2,16 x 10 <sup>4</sup>	0,67	4,77	1,99	-58,36
RB-10	Evento 37_B1	1,03 x 10 <sup>5</sup>	4,23	8,49	11,29	33,01
	Evento 40_B1	1,31 x 10 <sup>6</sup>	43,47	167,42	135,78	-18,90
	Evento 41_B1	7,98 x 10 <sup>4</sup>	1,93	4,48	6,66	48,79
	Evento 42_B1	9,01 x 10 <sup>4</sup>	2,04	3,44	7,28	111,84
	Evento 3_B2	9,03 x 10 <sup>5</sup>	33,80	99,33	98,63	-0,71
RB-11	Evento 10_B2	1,66 x 10 <sup>4</sup>	0,75	1,18	1,84	56,25
	Evento 2	8,79 x 10 <sup>4</sup>	0,38	2,85	2,43	-14,61
	Evento 3	3,20 x 10 <sup>4</sup>	0,35	1,51	1,39	-7,66
	Evento 22	7,77 x 10 <sup>3</sup>	0,09	0,22	0,33	46,62
	Evento 25	6,05 x 10 <sup>4</sup>	2,54	4,67	5,29	13,29
	Evento 26	8,30 x 10 <sup>4</sup>	1,71	5,94	5,08	-14,58
	Evento 27	4,38 x 10 <sup>5</sup>	14,35	85,19	35,03	-58,88

A proporção do erro obtido com o modelo validado em relação ao erro obtido com o modelo original não calibrado é visualizado na tabela abaixo, indicada em ordem crescente. A análise dos eventos individuais evidencia uma melhora muito significativa no modelo validado, com erros obtidos na validação em relação à MUSLE original, entre 2 e 1000 vezes menor. Dentre todos os eventos, apenas um apresentou um erro relativo superior ao da MUSLE original, o Evento 3\_B1 da bacia RB-11. Na calibração para as bacias separadas, o Evento 3\_B1 passa de um erro de 59,03% (MUSLE original) para -63,74% (MUSLE calibrada). Já na calibração das três bacias em conjunto, o Evento 3\_B1 vai de um erro de 59,03% (MUSLE original) para -58,33% (MUSLE calibrada). Observa-se que assim como ocorreu com a calibração, o evento que mais se aproximou da MUSLE com os coeficientes originais, foi o que mais se distanciou da tendência de todos os outros eventos da série validada.

**Tabela 27:** Comparação dos erros percentuais nos eventos individuais da validação, em ordem crescente de proporção entre erros, em valores absolutos.

		<b>Y observado (ton)</b>	<b>Erro (%) MUSLE original</b>	<b>Erro (%) MUSLE validação</b>	<b>Proporção entre o erro da MUSLE validação e o erro da MUSLE original</b>
<b>RB-01</b>	Evento 27	38,52	329,64	0,37	0,001
<b>3bc</b>	Evento 3_B2	99,33	457,01	-0,71	0,002
<b>3bc</b>	Evento 27	38,52	329,64	-4,66	0,014
<b>RB-11</b>	Evento 25	4,67	387,36	5,69	0,015
<b>3bc</b>	Evento 3	1,51	248,33	-7,66	0,031
<b>3bc</b>	Evento 25	4,67	387,36	13,29	0,034
<b>3bc</b>	Evento 40_B1	167,42	369,50	-18,90	0,051
<b>3bc</b>	Evento 26	5,94	265,96	-14,58	0,055
<b>3bc</b>	Evento 2	2,85	240,32	-14,61	0,061
<b>RB-10</b>	Evento 40_B1	167,42	369,50	22,64	0,061
<b>3bc</b>	Evento 37_B1	8,49	502,75	33,01	0,066
<b>RB-10</b>	Evento 10_B2	1,18	492,28	34,72	0,071
<b>3bc</b>	Evento 30	173,57	289,28	-23,85	0,082
<b>RB-11</b>	Evento 26	5,94	265,96	-23,20	0,087
<b>RB-01</b>	Evento 30	173,57	289,28	-25,87	0,089
<b>RB-10</b>	Evento 37_B1	8,49	502,75	45,34	0,090
<b>3bc</b>	Evento 41_B1	4,48	540,12	48,79	0,090
<b>RB-10</b>	Evento 41_B1	4,48	540,12	51,75	0,096
<b>RB-10</b>	Evento 3_B2	99,33	457,01	44,01	0,096
<b>3bc</b>	Evento 10_B2	1,18	492,28	56,25	0,114
<b>3bc</b>	Evento 22	0,22	379,88	46,62	0,123
<b>3bc</b>	Evento 36	23,48	882,85	111,71	0,127
<b>RB-01</b>	Evento 36	23,48	882,85	118,78	0,135
<b>3bc</b>	Evento 42_B1	3,44	819,41	111,84	0,136
<b>3bc</b>	Evento 38	7,44	717,75	98,50	0,137
<b>RB-10</b>	Evento 42_B1	3,44	819,41	118,59	0,145
<b>3bc</b>	Evento 3	237,37	225,00	-37,17	0,165
<b>RB-01</b>	Evento 38	7,44	717,75	120,94	0,169
<b>RB-01</b>	Evento 3	237,37	225,00	-39,29	0,175
<b>3bc</b>	Evento 31	4,06	1191,25	217,62	0,183
<b>RB-01</b>	Evento 31	4,06	1191,25	256,48	0,215
<b>3bc</b>	Evento 35	1,92	3937,30	858,90	0,218
<b>RB-11</b>	Evento 22	0,22	379,88	-88,94	0,234
<b>RB-01</b>	Evento 35	1,92	3937,30	953,01	0,242
<b>RB-11</b>	Evento 2	2,85	240,32	-60,56	0,252
<b>RB-11</b>	Evento 3	1,51	248,33	-74,27	0,299
<b>3bc</b>	Evento 27	85,19	113,07	-58,88	0,521
<b>3bc</b>	Evento 3_B1	4,77	59,03	-58,36	0,989
<b>RB-11</b>	Evento 27	85,19	113,07	112,80	0,998
<b>RB-10</b>	Evento 3_B1	4,77	59,03	-63,74	1,080



**Figura 34:** Comparação entre o erro percentual da relação produção de sedimentos MUSLE com os coeficientes calibrados e MUSLE com os coeficientes não calibrados, nos eventos individuais para as bacias analisadas individualmente e para as três em conjunto.

Nos casos em que a proporção de erro entre o erro obtido na validação e o erro obtido na MUSLE original foi próximo a zero, a equação calibrada e validada pôde prever com precisão a produção de sedimentos nesses eventos individuais.

### 5.3.5. Coeficiente de Nash-Sutcliffe

A consistência e precisão dos dados resultantes do modelo quando comparados com os dados observados foi feita com o cálculo do Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE). Essa comparação foi feita com os coeficientes originais da equação da MUSLE e com os coeficientes calibrados. As tabelas abaixo apresentam os parâmetros de cálculo e o resultado do NSE para a produção de sedimentos nas bacias.

Os valores encontrados para a RB-01, com os coeficientes originais e ajustados encontram-se na Tabela 28 e Tabela 28, respectivamente.

**Tabela 28:** Produção de sedimentos observados em campo para a bacia RB-01 e simulados pela MUSLE com coeficientes originais.

	<b>Y MUSLE_coeficientes originais (ton)</b>	<b>Y medido (ton)</b>	<b>(Y_MUSLE-Ymedido)<sup>2</sup></b>	<b>(Ymedido-Ymédio)<sup>2</sup></b>
<b>Evento 1</b>	940,07	725,64	45980,85	44271,88
<b>Evento 5</b>	2747,04	846,11	3613518,99	8088,00
<b>Evento 18</b>	5269,69	688,73	20985159,92	61164,84
<b>Evento 22</b>	43549,51	3190,70	1628833439,05	5083480,16
<b>Evento 23</b>	1467,73	193,10	1624672,66	551963,40
<b>Evento 24</b>	1500,35	169,16	1772073,67	588113,34
<b>Evento 28</b>	472,15	81,84	152343,79	729670,44
<b>Evento 29</b>	28757,11	3404,28	642765699,39	6092187,31
<b>Evento 33</b>	58,13	14,36	1915,78	849503,92
<b>Evento 37</b>	567,62	46,53	271530,17	791236,88
			<b>Coefficiente de Nash-Sutcliffe</b>	<b>-154,41</b>

**Tabela 29:** Produção de sedimentos observados em campo e simulados pela MUSLE com coeficientes calibrados para a RB-01.

	<b>Y MUSLE_coeficientes calibrados (ton)</b>	<b>Y medido (ton)</b>	<b>(Ycalibrado-ymedido)<sup>2</sup></b>	<b>(Ymedido-Ymédio)<sup>2</sup></b>
<b>Evento 1</b>	170,62	725,64	308043,40	44271,88
<b>Evento 5</b>	426,62	846,11	175971,23	8088,00
<b>Evento 18</b>	744,46	688,73	3105,65	61164,84
<b>Evento 22</b>	4526,04	3190,70	1783127,33	5083480,16
<b>Evento 23</b>	249,69	193,10	3201,57	551963,40
<b>Evento 24</b>	254,42	169,16	7269,44	588113,34
<b>Evento 28</b>	94,72	81,84	165,83	729670,44
<b>Evento 29</b>	3174,53	3404,28	52786,45	6092187,31
<b>Evento 33</b>	15,81	14,36	2,10	849503,92
<b>Evento 37</b>	110,86	46,53	4138,18	791236,88
			<b>Coefficiente de Nash-Sutcliffe</b>	<b>0,84</b>

Os parâmetros de cálculo e o resultado do NSE para a produção de sedimentos na bacia RB-10, obtidos com os coeficientes originais e ajustados encontram-se na Tabela 30 e Tabela 31, respectivamente.

**Tabela 30:** Produção de sedimentos observados em campo para a bacia RB-10 e simulados pela MUSLE com coeficientes originais.

	<b>Y MUSLE_coeficientes originais (ton)</b>	<b>Y medido (ton)</b>	<b>(Y_MUSLE-Ymedido)<sup>2</sup></b>	<b>(Ymedido-Ymédio)<sup>2</sup></b>
<b>Evento 2_B1</b>	4,58	2,13	6,03	42,42
<b>Evento 4_B1</b>	9,22	1,41	60,95	52,27
<b>Evento 6_B1</b>	11,56	1,73	96,57	47,76
<b>Evento 11_B1</b>	40,11	12,61	756,24	15,75
<b>Evento 13_B1</b>	26,02	10,94	227,54	5,28
<b>Evento 14_B1</b>	47,96	11,89	1301,17	10,56
<b>Evento 36_B1</b>	97,53	30,07	4550,96	459,09
<b>Evento 38_B1</b>	43,13	8,75	1181,74	0,01
<b>Evento 1_B2</b>	24,70	3,81	436,41	23,35
<b>Evento 5_B2</b>	19,49	3,07	269,41	30,99
			<b>Coefficiente de Nash-Sutcliffe</b>	<b>-11,93</b>

**Tabela 31:** Produção de sedimentos observados em campo e simulados pela MUSLE com coeficientes calibrados para a bacia RB-10.

	<b>Y MUSLE_coeficientes calibrados (ton)</b>	<b>Y medido (ton)</b>	<b>(Ycalibrado- Ymedido)<sup>2</sup></b>	<b>(Ymedido- Ymédio)<sup>2</sup></b>
Evento 2_B1	1,03	2,13	1,20	42,42
Evento 4_B1	2,11	1,41	0,50	52,27
Evento 6_B1	2,67	1,73	0,88	47,76
Evento 11_B1	9,60	12,61	9,04	15,75
Evento 13_B1	6,15	10,94	22,91	5,28
Evento 14_B1	11,54	11,89	0,12	10,56
Evento 36_B1	23,97	30,07	37,23	459,09
Evento 38_B1	10,35	8,75	2,55	0,01
Evento 1_B2	5,83	3,81	4,09	23,35
Evento 5_B2	4,57	3,07	2,23	30,99
			<b>Coeficiente de Nash-Sutcliffe</b>	<b>0,88</b>

Os parâmetros de cálculo e o resultado do NSE para a produção de sedimentos na bacia RB-11, obtidos com os coeficientes originais e ajustados encontram-se na Tabela 32 e Tabela 32, respectivamente.

**Tabela 32:** Produção de sedimentos observados em campo para a bacia RB-11 e simulados pela MUSLE com coeficientes originais.

	<b>Y MUSLE_coeficientes originais (ton)</b>	<b>Y medido (ton)</b>	<b>(Y_MUSLE- Ymedido)<sup>2</sup></b>	<b>(Ymedido- Ymédio)<sup>2</sup></b>
Evento 4	46,87	1,00	2104,46	2181,81
Evento 5	26,55	10,87	246,09	1357,47
Evento 6	17,84	5,91	142,13	1746,88
Evento 24	42,08	18,48	556,94	854,12
Evento 28	13,40	2,66	115,23	2029,12
Evento 29	18,69	2,43	264,16	2049,84
Evento 1 - B2	13,77	2,66	123,41	2029,84
Evento 2 - B2	122,99	337,66	46081,74	84070,63
			<b>Coeficiente de Nash-Sutcliffe</b>	<b>0,48</b>

**Tabela 33:** Produção de sedimentos observados em campo e simulados pela MUSLE com coeficientes calibrados para a bacia RB-11.

	<b>Y MUSLE_coeficientes calibrados (ton)</b>	<b>Y medido (ton)</b>	<b>(Ycalibrado- Ymedido)<sup>2</sup></b>	<b>(Ymedido- Ymédio)<sup>2</sup></b>
Evento 4	17,30	1,00	265,63	2181,81
Evento 5	6,45	10,87	19,49	1357,47
Evento 6	3,23	5,91	7,18	1746,88
Evento 24	14,35	18,48	17,12	854,12
Evento 28	1,97	2,66	0,48	2029,12
Evento 29	3,51	2,43	1,15	2049,84
Evento 1 - B2	2,06	2,66	0,35	2029,84
Evento 2 - B2	92,26	337,66	60220,52	84070,63
			<b>Coeficiente de Nash-Sutcliffe</b>	<b>0,37</b>

Os parâmetros de cálculo e o resultado do NSE para a produção de sedimentos nas três bacias juntas, obtidos com os coeficientes originais e ajustados encontram-se na Tabela 34 e 34, respectivamente.

**Tabela 34:** Produção de sedimentos observados em campo para as três bacias e simulados pela MUSLE com coeficientes originais.

	Y MUSLE_coeficientes originais (ton)	Y medido (ton)	(Y_MUSLE- Ymedido) <sup>2</sup>	(Ymedido- Ymedio) <sup>2</sup>	
RB-01	Evento 1	940,07	725,64	45980,85	140339,16
	Evento 5	2747,04	846,11	3613518,99	245118,30
	Evento 18	5269,69	688,73	20985159,92	114049,56
	Evento 22	43549,51	3190,70	1628833439,05	8063810,66
	Evento 23	1467,73	193,10	1624672,66	24937,11
	Evento 24	1500,35	169,16	1772073,67	33072,32
	Evento 28	1500,35	81,84	2012183,64	72457,86
	Evento 29	28757,11	3404,28	642765699,39	9322416,10
	Evento 33	58,13	14,36	1915,78	113338,51
	Evento 37	1579,87	46,53	2351125,64	92712,61
RB-10	Evento 2_B1	4,58	2,13	6,03	121726,30
	Evento 4_B1	9,22	1,41	60,95	122227,03
	Evento 6_B1	11,56	1,73	96,57	122003,99
	Evento 11_B1	40,11	12,61	756,24	114522,19
	Evento 13_B1	26,02	10,94	227,54	115655,80
	Evento 14_B1	47,96	11,89	1301,17	115009,57
	Evento 36_B1	97,53	30,07	4550,96	103011,01
	Evento 38_B1	43,13	8,75	1181,74	117147,75
	Evento 1_B2	24,70	3,81	436,41	120555,81
	Evento 5_B2	19,49	3,07	269,41	121066,89
RB-11	Evento 4	46,87	1,00	2104,46	122513,68
	Evento 5	26,55	10,87	246,09	115704,45
	Evento 6	17,84	5,91	142,13	119097,76
	Evento 24	42,08	18,48	556,94	110579,62
	Evento 28	13,40	2,66	115,23	121351,53
	Evento 29	18,69	2,43	264,16	121511,42
	Evento 1 - B2	13,77	2,66	123,41	121357,08
	Evento 2 - B2	122,99	337,66	46081,74	178,50
			<b>Coeficiente de Nash-Sutcliffe</b>	<b>-112,91</b>	

**Tabela 35:** Produção de sedimentos observados em campo e simulados pela MUSLE com coeficientes calibrados para as três bacias.

	Y MUSLE_coeficientes calibrados (ton)	Y medido (ton)	(Ycalibrado- Ymedido) <sup>2</sup>	(Ymedido- Ymedio) <sup>2</sup>	
RB-01	Evento 1	178,54	725,64	299318,22	140339,16
	Evento 5	473,90	846,11	138540,65	245118,30
	Evento 18	857,53	688,73	28491,97	114049,56
	Evento 22	5864,44	3190,70	7148839,10	8063810,66
	Evento 23	267,84	193,10	5585,20	24937,11
	Evento 24	273,25	169,16	10835,03	33072,32
	Evento 28	95,38	81,84	183,38	72457,86
	Evento 29	4019,25	3404,28	378186,53	9322416,10
	Evento 33	14,17	14,36	0,04	113338,51



	Evento 37	112,79	46,53	4390,03	92712,61
<b>RB-10</b>	Evento 2_B1	1,26	2,13	0,76	121726,30
	Evento 4_B1	2,37	1,41	0,92	122227,03
	Evento 6_B1	2,91	1,73	1,40	122003,99
	Evento 11_B1	9,05	12,61	12,69	114522,19
	Evento 13_B1	6,10	10,94	23,39	115655,80
	Evento 14_B1	10,65	11,89	1,55	115009,57
	Evento 36_B1	20,31	30,07	95,14	103011,01
	Evento 38_B1	9,66	8,75	0,83	117147,75
	Evento 1_B2	5,82	3,81	4,04	120555,81
	Evento 5_B2	4,69	3,07	2,61	121066,89
<b>RB-11</b>	Evento 4	10,21	1,00	84,88	122513,68
	Evento 5	6,09	10,87	22,83	115704,45
	Evento 6	4,24	5,91	2,81	119097,76
	Evento 24	9,26	18,48	85,13	110579,62
	Evento 28	3,27	2,66	0,36	121351,53
	Evento 29	4,42	2,43	3,95	121511,42
	Evento 1 - B2	3,35	2,66	0,48	121357,08
	Evento 2 - B2	24,58	337,66	98020,19	178,50
			<b>Coefficiente de Nash-Sutcliffe</b>	<b>0,60</b>	

O resumo dos valores obtidos para o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe, para a bacia RB-01 e suas sub-bacias RB-10 e RB-11, encontram-se na Tabela 36.

**Tabela 36:** Fator de Nash-Sutcliffe obtidos para cada bacia e para as bacias juntas

	<b>NSE_MUSLE original</b>	<b>NSE_MUSLE calibrada</b>	<b>NSE_MUSLE validada</b>
<b>RB-01</b>	-154,41	0,84	0,78
<b>RB-10</b>	-11,93	0,88	0,87
<b>RB-11</b>	0,48	0,37	-0,64
<b>3 bacias</b>	-112,91	0,60	0,85

De maneira geral, observa-se que o modelo MUSLE com coeficientes não calibrados gera resultados superestimados para produção de sedimentos na bacia do Rio dos Bugres.

Exceto na bacia RB-11, o coeficiente de Nash-Sutcliffe (utilizando-se os coeficientes originais) mostrou-se negativo, principalmente considerando os eventos da bacia RB-01 (-154,41) e considerando todos eventos estudados nas 3 bacias (-112,91), indicando uma aproximação de baixa eficiência, com valor inferior ao mínimo de 0,36 para que seja considerado aceitável. O coeficiente de Nash-Sutcliffe para a bacia RB-11 foi maior considerando o cálculo da MUSLE a partir dos coeficientes originais (NSE=0,48), ainda que o coeficiente obtido com os coeficientes calibrados (NSE=0,37), esteja dentro dos valores

aceitáveis para o modelo. Na calibração da RB-11, foi inserido o Evento 2\_B2, evento extremo com maior pico no sedimentograma para toda a série analisada.

Na calibração, o fator de Nash-Sutcliffe obtido para a RB-11 e pelas três bacias em conjunto foi mensurado em 0,37 e 0,6, valores considerados aceitáveis para o modelo. Na validação, todos coeficientes de Nash-Sutcliffe classificaram os modelos como bons (acima de 0,75), à exceção da análise na bacia individual RB-11. Observa-se que a aplicação dos coeficientes obtidos na calibração da bacia RB-11, considerando os eventos da validação, resultou em NSE de -0,64, valor considerado inadequado para o modelo. A escolha dos eventos para configurar esta bacia foi comprometida, pois os pontos representativos dos eventos não tiveram boa dispersão. Os dados de diferença quadrática entre o calculado usando a calibração e o medido em campo, evidenciam este fato, visto que variaram pouco, o que aumentou muito a média e influenciou o resultado do coeficiente de Nash-Sutcliffe.

Assim, a avaliação estatística da calibração indica uma aproximação de alta eficiência, com NSE entre bom e aceitável para todas as bacias, indicando uma relação significativa entre a produção de sedimentos na bacia durante o período amostrado e os modelos gerados. O resultado obtido indica que a MUSLE calibrada representa bem a média dos eventos, e que para bacias menores e em eventos de baixa magnitude, tem uma aproximação de menor eficiência.

#### 5.3.6. Fator de escala

O presente trabalho buscou a calibração e a validação de eventos de chuva ocorridos entre dezembro de 2011 e novembro de 2012. Pode-se observar que o modelo da MUSLE não é capaz de capturar as todas as diferenças físicas e processos que ocorrem na bacia. Na busca por melhorar a representação, a área foi dividida em sub-bacias menores para análise dos parâmetros. A modelagem foi feita para quatro escalas: para a bacia do rio dos Bugres (RB-01), para a bacia RB-10, para a bacia RB-11 e para os eventos que compõe as três bacias juntas. A bacia RB-10 e a bacia RB-11 são sub-bacias de cabeceira da RB-01, estando a bacia RB-11 inserida na RB-10.

A análise detalhada dos eventos de chuva individuais, conforme erro percentual, encontra-se descrito no item 5.3.3 (referente à etapa de calibração) e item 5.3.4 (referente à etapa de validação). Observa-se que os modelos, não só na calibração mas também na validação, aproximaram de forma significativa a produção de sedimentos quando em comparação com a aplicação da MUSLE com os coeficientes originais. Indicando que, no geral, a produção de sedimentos dos eventos individuais se aproxima com maior precisão nos modelos calibrados, em relação à aplicação da MUSLE com os coeficientes não calibrados.

Os eventos de menor porte não ficaram tão bem representados como os de médio e grande porte. Observa-se uma tendência de maior produção de sedimentos na bacia maior, enquanto as bacias menores apresentam tendência a média e baixa produção de sedimentos, conforme observado pela produção de sedimentos específica.

A análise do coeficiente de Nash-Sutcliffe, que avalia o desempenho dos modelos obtidos no conjunto dos eventos considerados, indica uma aproximação de alta eficiência, entre bom e aceitável para todas as bacias, à exceção do resultado obtido na validação da bacia menor, a RB-11. A escolha dos eventos para calibração e validação influenciou de forma significativa o resultado para a bacia menor, indicando que esse é um fator sensível na modelagem.

Com os resultados obtidos, não é possível afirmar que o modelo é melhor aplicado para bacias maiores, tendo em vista que o pior desempenho da bacia RB-11 está associado a eventos extremos, o Evento 2-B2 da calibração (pico do sedimentograma em toda a série verificada) e o Evento 27 (muito superior aos outros selecionados na validação).

Os resultados obtidos para NSE das bacias analisadas individualmente, indicam que para a bacia de cabeceira RB-10 apresentou melhor aproximação do modelo (NSE 0,88 na calibração e NSE 0,87 na validação).

Como trabalho futuro, indica-se uma análise mais robusta, com mais eventos avaliados de diferentes magnitudes, principalmente para a bacia menor, para avaliação da influencia do fator de escala na modelagem.

## 6. CONCLUSÃO

De maneira geral, o modelo MUSLE aplicado à bacia do Rio dos Bugres, sem a calibração de seus parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ , superestima a produção de sedimentos.

A calibração da RB-01 resultou em  $\alpha$  de 7,86,  $\beta$  de 0,48 e NSE de 0,84, para a RB-10 em  $\alpha$  de 2,30,  $\beta$  de 0,58 e NSE de 0,88, para a RB-11 em  $\alpha$  de 0,02,  $\beta$  de 0,97 e NSE de 0,37, enquanto que para as três bacias em conjunto resultou em  $\alpha$  de 5,00,  $\beta$  de 0,51 e NSE de 0,60. A validação da RB-01 resultou em NSE de 0,78, para a RB-10 em NSE de 0,87, para a RB-11 em NSE de -0,64, e para as três bacias em conjunto resultou em NSE de 0,85.

A análise da proporção do erro percentual, para os eventos de validação individuais, entre o calculado pela MUSLE com os coeficientes originais ( $\alpha = 11,8$  e  $\beta = 0,56$ ) e o calculado pela MUSLE com os coeficientes calibrados para as bacias, indica uma aproximação dos modelos de 2 a 1000 vezes melhor, à exceção de dois eventos isolados. A avaliação estatística na calibração indica uma aproximação de alta eficiência, com NSE entre bom e aceitável para todas as bacias, indicando uma relação significativa entre a produção de sedimentos na bacia durante o período amostrado e os modelos gerados. O resultado obtido indica que a MUSLE calibrada representa bem a média dos eventos, e que para bacias menores e em eventos de baixa magnitude, tem uma aproximação de menor eficiência.

Assim, os modelos MUSLE gerados na busca pela representação da produção de sedimentos local, considerando as características específicas da bacia do Rio dos Bugres e a calibração de seus coeficientes, retornam índices de eficiência de Nash-Sutcliffe que variam entre o considerado aceitável e bom para os modelos.

A utilização de ferramentas de análise geoespacial (SIG) juntamente ao modelo matemático MUSLE permite a construção de previsões de perda de solos consistentes, quando os seus coeficientes são calibrados.

## REFERÊNCIAS

AVANZI, Junior C. et al . Calibração e aplicação do modelo MUSLE em uma microbacia hidrográfica nos Tabuleiros Costeiros brasileiros. Rev. bras. eng. agríc. ambient., Campina Grande , v. 12, n. 6, p. 563-569, Dec. 2008 . Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662008000600001&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662008000600001&lng=en&nrm=iso)> Acesso em: 08 Jan. 2020.

BATISTEL , L.; GRISON, F.; MOTA, A. A. & KOBİYAMA, M. 2017. Tempo de concentração da bacia hidrográfica do Rio dos Bugres no município de Rio Negrinho (SC).In: Simposio Brasileiro de Recursos Hídricos (22. : 2017 : Florianópolis, SC) Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/173635>>. Acesso em 04/01/2020.

BELLINASSO, T. B.; PAIVA, J. B. D. 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. 2007 Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/242591622\\_Avaliacao\\_da\\_Producao\\_de\\_Sedimentos\\_em\\_Eventos\\_Chuvosos\\_em\\_uma\\_Pequena\\_Bacia\\_Hidrografica\\_Semi-Urbana\\_de\\_Encosta](https://www.researchgate.net/publication/242591622_Avaliacao_da_Producao_de_Sedimentos_em_Eventos_Chuvosos_em_uma_Pequena_Bacia_Hidrografica_Semi-Urbana_de_Encosta)> Acesso em: 08/01/2020

BORTOLUZZI, C.A. & SILVA, L.C. (1987). Texto explicativo para o mapa geológico de Santa Catarina. 11º Distrito do Departamento Nacional de produtos minerais, coordenadoria de recursos Minerais de Secretaria de Ciência e Tecnologia, Minas e Energia Florianópolis-SC.

CARDOSO, A. T. Estudo hidrossedimentológico em três bacias embutidas no município de Rio Negrinho - SC. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2014. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/1167>>. Acesso em 08/07/2021.

CHECCHIA, T. Avaliação de perda de solo por erosão hídrica e Estudo de emergência na bacia do rio caeté, Alfredo Wagner - SC. 2005. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <[https://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/dissertacao\\_tatiane\\_final\\_completa.PDF](https://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/dissertacao_tatiane_final_completa.PDF)> Acesso em 20/10/2021.

CENSI, G. Tank Model modificado para escoamento e produção de sedimentos. 2019. Disponível em:

<<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/197935/001096302.pdf?sequence=1>> Acesso em 11/09/2021.

COLLISCHONN, W. Simulação hidrológica em grandes bacias. 2001. 194f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/2500>> Acesso em 12/10/2021.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. Introduzindo hidrologia. 6. ed. Porto Alegre, RS: IPH UFRGS, 2008. 274 p.

COSTA, F.H. S.; SOUZA FILHO, C. R.; RISSO, A. Modelagem espaço-temporal da erosão e potencial contaminação de Arsênio e Chumbo na bacia hidrográfica do rio Ribeira de Iguape (SP). Revista Brasileira de Geociências, v. 39, n. 2, p. 338-349, 2009. Disponível em: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/7667>> Acesso em 19/10/2021.

COSTA, T.; LANÇA, R. Hidrologia de superfície. Escola Superior de Tecnologia. Área de Engenharia Civil, Núcleo de Hidráulica e Ambiente. Universidade do Algarve. Faro, Portugal, 2001.

ECKHARDT, K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. Hydrological Processes, v. 19, p. 507-515, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro:EMBRAPA-Cnps, 2006.306p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). SOLOS do Estado de Santa Catarina. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 721 p. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n 46). LEVANTAMENTO de reconhecimento dos solos do Estado de Santa Catarina. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 1 mapa, color., Escala 1:250.000.

JAMES, L. D. & BURGESS, S. J. Selection, calibration and testing of hydrologic models. In: HAAN, C. T., JOHNSON, H. P.; BRAKENSIEK, D. L. Hydrologic modelling of small watersheds. St. Joseph: ASAE, 1982. p. 437-472. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/309736708\\_Selection\\_Calibration\\_and\\_Testing\\_of\\_Hydrologic\\_Models\\_Chapter\\_11\\_in\\_CT\\_Haan\\_HP\\_Johnson\\_an](https://www.researchgate.net/publication/309736708_Selection_Calibration_and_Testing_of_Hydrologic_Models_Chapter_11_in_CT_Haan_HP_Johnson_an)

d\_DL\_Brakensiek\_Eds\_Hydrologic\_Modeling\_of\_Small\_Watersheds\_American\_Society\_of\_Agricultural\_Engineers\_Hydrolo> Acesso em 30/12/2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed., Brasília, DF: Embrapa, 2018.

EPAGRI/CIRAM. Mapas Digitais de Santa Catarina. Disponível em:<<http://ciram.epagri.sc.gov.br/mapoteca/>>. Acesso em 08/09/2021.

FAGUNDES, F. S. Estudo sobre a separação de escoamento e a relação entre vazão e turbidez na bacia hidrográfica do Rio dos Bugres no município de Rio Negrinho – SC. Disponível em: <https://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/FelipeFagundes.pdf>> Acesso em 10/09/2021.

FERREIRA, C.S.; LIMA, C.S.; CAVALCANTI, L.C.S.; SANTOS, A.H.O. Caracterização morfométrica da Bacia Hidrográfica Do Açude Saco I , no município de Serra Talhada - PE, Brasil. VIII Simpósio Nacional de Geomorfologia. Disponível em: < <http://lsie.unb.br/ugb/sinageo/8/1/29.pdf>> Acesso em: 12/10/2021.

FORNELOS, L. F.; SILVA, S. M. A. 2006. Uso de Modelos Digitais de Elevação (MDE) gerados a partir de imagens de radar interfométrico (SRTM) na estimativa de perdas de solo. In: Simpósio de Geotecnologias no Pantanal. Campo Grande/MS. Disponível em: < <http://mtc-m16b.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2006/12.11.15.47>>. Acesso em 15/11/2021.

GRANDO, A.; MACIEL, C. B.; KOBAYAMA, M.; RIBAS, JR. U.; LANGA, R. Avaliação da perda de solos na área de reflorestamento de Pinus taeda com modelo RUSLE: Estudo de caso de Rio Negrinho/SC. In: VIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos (2008: Campo Grande) Campo Grande: UFMS, Anais, 2008.

GRISON, F. 2013. Estudo da geometria hidráulica do Rio dos Bugres, no município de Rio Negrinho - SC Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/107510>> Acesso em 08/07/2021.

GRISON, F.; MOTA, A. A.; KOBAYAMA, M. (2014). Geometria hidráulica de seções transversais do rio dos Bugres. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 19, n.4, p. 205-213. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/107510>>. Acesso em 12/10/2021.

GUERRA, A. J. T. 2008. Processos erosivos nas encostas. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro. 8º edição. Bertrand Brasil.

IBGE/PORTAL DE MAPAS. Perfil de Metadados Geoespaciais do Brasil. Disponível em: <<https://portaldemapas.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 10/09/2021.

KOBAYAMA, M.; CHECCHIA, T.; CORSEUIL, C.W.; LINO, J.F.L.; LOPES, N.H.Y.; GRISON, F.; CHAFFE, P.L.B.; MALUTTA, S.; RIBAS JUNIOR, U.; LANGA, R.; BASSOS. Forest hydrology project (UFSC–MOBASA) for water resources management in Rio Negrinho City, Santa Catarina, Brazil. In: VAN de GIESEN, N.; XIA, J.; ROSBJERG, D.; FUKUSHIMA, Y. (eds.) Changes in Water Resources Systems: Methodologies to Maintain Water Security and Ensure Integrated Management. Wellington: IAHS, v.315, p.250-257, 2007. Disponível em: <<https://iahs.info/uploads/dms/14088.35-250-257-06-34-KOBAYAMA.pdf>> Acesso em 15/11/2021.

LOPES, N. H. Y. Influências dos usos do solo nos processos hidrológicos em microbacias experimentais. 2007. Disponível em: <[https://www.labhidro.ufsc.br/Projetos/ARTI\\_2008/TCC\\_Nadia.pdf](https://www.labhidro.ufsc.br/Projetos/ARTI_2008/TCC_Nadia.pdf)>. Acesso em 26/10/2021.

LOPES, N. H. Y. 2008. Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/91899>> Acesso em 21/10/2021.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C. 1992. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP). Bragantia, V. 51, N.2, p. 189-196. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/brag/a/JVzbSngjnsnGX3mFhQyXQNG/abstract/?lang=pt>>. Acesso em 15/11/2021.

MALLMANN, E. H. ; SALVADOR, C. G.; MICHEL, G. P. Aplicação da MUSLE considerando diferentes métodos de cálculo do fator topográfico LS. 2019. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Disponível em:



<<https://www.ufrgs.br/gpden/wordpress/wp-content/uploads/2020/02/APLICA%C3%87%C3%83O-DA-MUSLE-CONSIDERANDO-DIFERENTES-M%C3%89TODOS-DE-C%C3%81LCULO-DO-FATOR-TOPOGR%C3%81FICO-LS.pdf>>. Acesso em 15/11/2021.

MALUTTA, S. Estudo hidrossedimentológico da bacia hidrográfica do Rio Negrinho - SC com o modelo SWAT. 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/96212>> Acesso em 15/10/2021.

NARDINI, R. C.; POLLO, R. A.; CAMPOS, S.; BARROS, Z. X.; CARDOSO, L. G.; GOMES, L. N. Análise morfométrica e simulação das Áreas de Preservação Permanente de uma microbacia hidrográfica. Irriga, Botucatu, v. 18, n. 4, p. 687-699, 2013. Disponível em:<<https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/669>> Acesso em 21/10/2021.

NASH, J. E. & SUTCLIFFE, I. V. River Flow Forecasting Throigh Conceptual Models. Journal of Hydrology, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

ODONGO, V. O.; ONYANDO, J. O.; MUTUA, B. M.; VAN OEL, P. R.; BECHT, R. Sensitivity analysis and calibration of the Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) for the upper Malewa Catchment, Kenya. International Journal of Sediment Research, v. 28, p. 368-383, 2013.

PAES, F. S. Áreas de Preservação Permanente em bacias hidrográficas e sua importância na prevenção da perda de solo por erosão. 2010. Disponível em: <[https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1478/dissertacao\\_0037131.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1478/dissertacao_0037131.pdf?sequence=1&isAllowed=y)> Acesso em 21/10/2021.

PEREIRA, J. S. Avaliação das perdas de solos por erosão laminar na área de influência da UHE Amador Aguiar I. 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/16206/1/AvaliacaoPerdasSolos.pdf>>. Acesso em 02/11/2021.

SADEGHI, S.H.R. GHOLAMI, L. KHALEDI DARVISHAN, A. & SAEIDI, P. A review of the application of the MUSLE model worldwide, Hydrological Sciences Journal, 59:2, 365-375, 2014 Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.866239> Acesso em 8/01/2020 Acesso em 08/01/2020

SANTOS, S. A. Análise de suscetibilidade e potencial á erosão laminar da Área de Preservação Ambiental das Nascentes do Rio Vermelho. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1610.pdf>> Acesso em 21/12/2021.

SANTOS, W. S. Modelagem espaço-temporal da erosão e potencial contaminação de Arsênio e Chumbo na bacia hidrográfica do rio Ribeira de Iguape. 2019. Disponível em: <[https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/4799/1/TCC\\_WAGNER\\_2019.pdf](https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/4799/1/TCC_WAGNER_2019.pdf)> Acesso em 21/10/2021.

SCHICK, J; BERTOL, I; COGO, N. P.; GONZÁLEZ, A.P. Erodibilidade de um Cambissolo Húmico sob chuva natural. Rev. Bras. Ciênc. Solo 38 (6). Dez 2014 Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/Q9YXWGRtfZx3JZgLDRcTJ3p/?lang=pt>> Acesso em 19/10/2021.

SIGSC. 2010. Sistema de Informações Geográficas. Governo do estado de Santa Catarina. Modelo digital de terreno resolução de 1 metro. Disponível em: <<http://sigsc.sc.gov.br/download/index.jsp>> Acesso em 10/12/2021.

SILVA, C. R.; CHAVES, H. M. L.; CAMELO, A. P. Calibração e validação da equação universal de perda de solos modificada (MUSLE) utilizando dados hidrossedimentológicos locais . Rev. Bras. Ciênc. Solo 35 (4). Ago 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000400037>. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/K7FjggYSYgt9CJ7YDFPwhFb/?lang=pt>> Acesso em 10/12/2021.

SILVA, L. F. S.; MARINHO, M. A.; ROCCO, E. O.; WALTER, M. K. C.; BOSCHI, R. S. Métodos indiretos de estimativa da erodibilidade de um latossolo vermelho da região de Campinas, SP. Disponível em: <<https://www.revistacta.ufscar.br/index.php/revistacta/article/download/25/29>> Acesso em 10/12/2021.

ÜHLBAUER, R. METODOLOGIA PARA MITIGAÇÃO DE PROBLEMAS DE INUNDAÇÃO EM CIDADES – ESTUDO DE CASO: RIO NEGRINHO/SC. 2017. Disponível em:< <https://lactec.org.br/dissertacoes/222-metodologia-para-mitigacao-de-problemas-de-inundacao-em-cidades-estudo-de-caso-rio-negrinho-sc/>> Acesso em 21/10/2021.

VARDANEGRA, L. (2008) Análise da adequação do uso do solo da área de proteção ambiental do alto Rio Preto - Rio Negrinho-SC. TCC Engenharia Ambiental e Sanitária UFSC. Disponível em : <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/124437/146.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em 08/01/2020

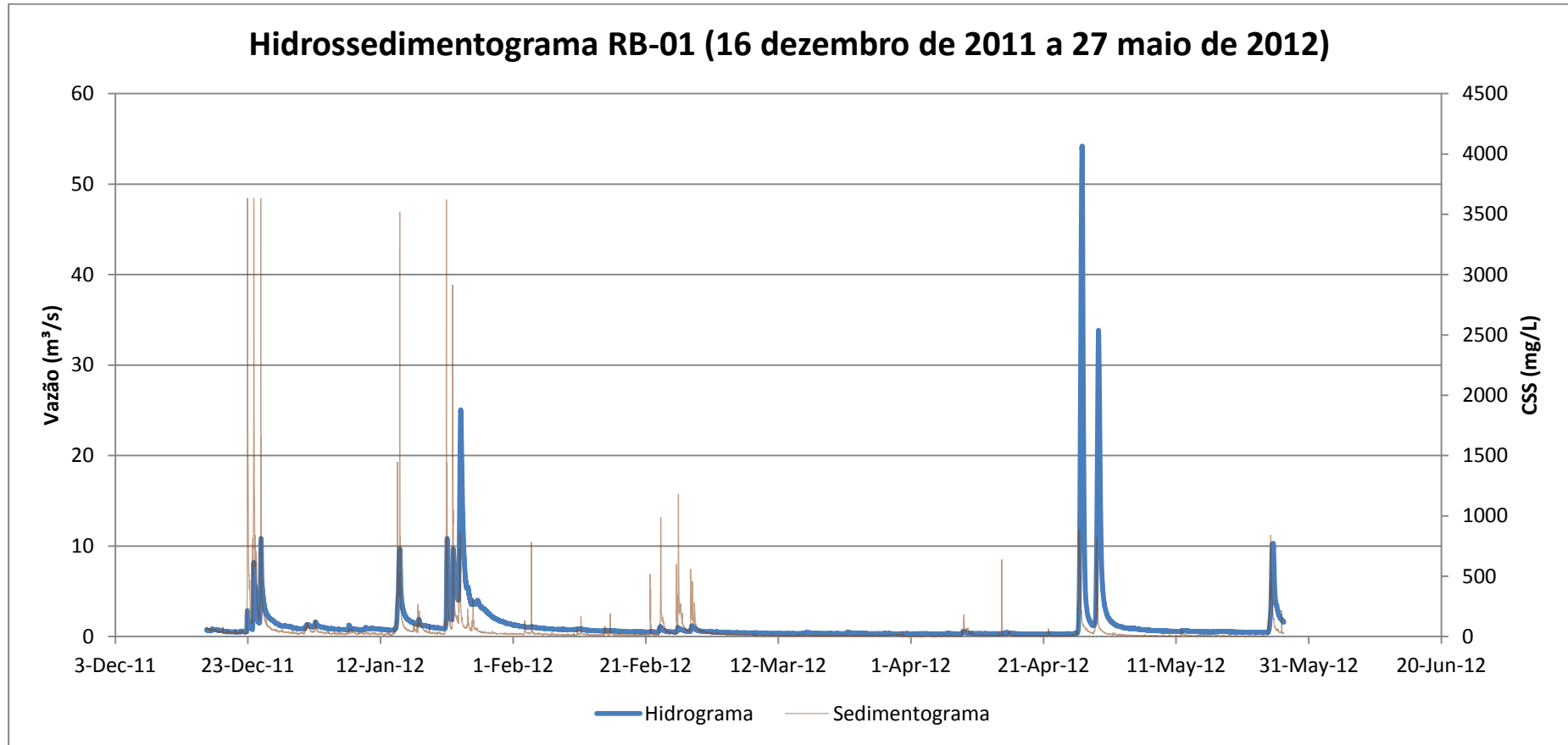
WILLIAMS, J. R. Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. In: Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources. Oxford: USDA. ARS-S-40, 1975. p.244-252.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation. Washington: USDA, 1965. 47p. Agriculture Handbook, 282. Disponível em: <<http://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>> Acesso em 29/12/2019.

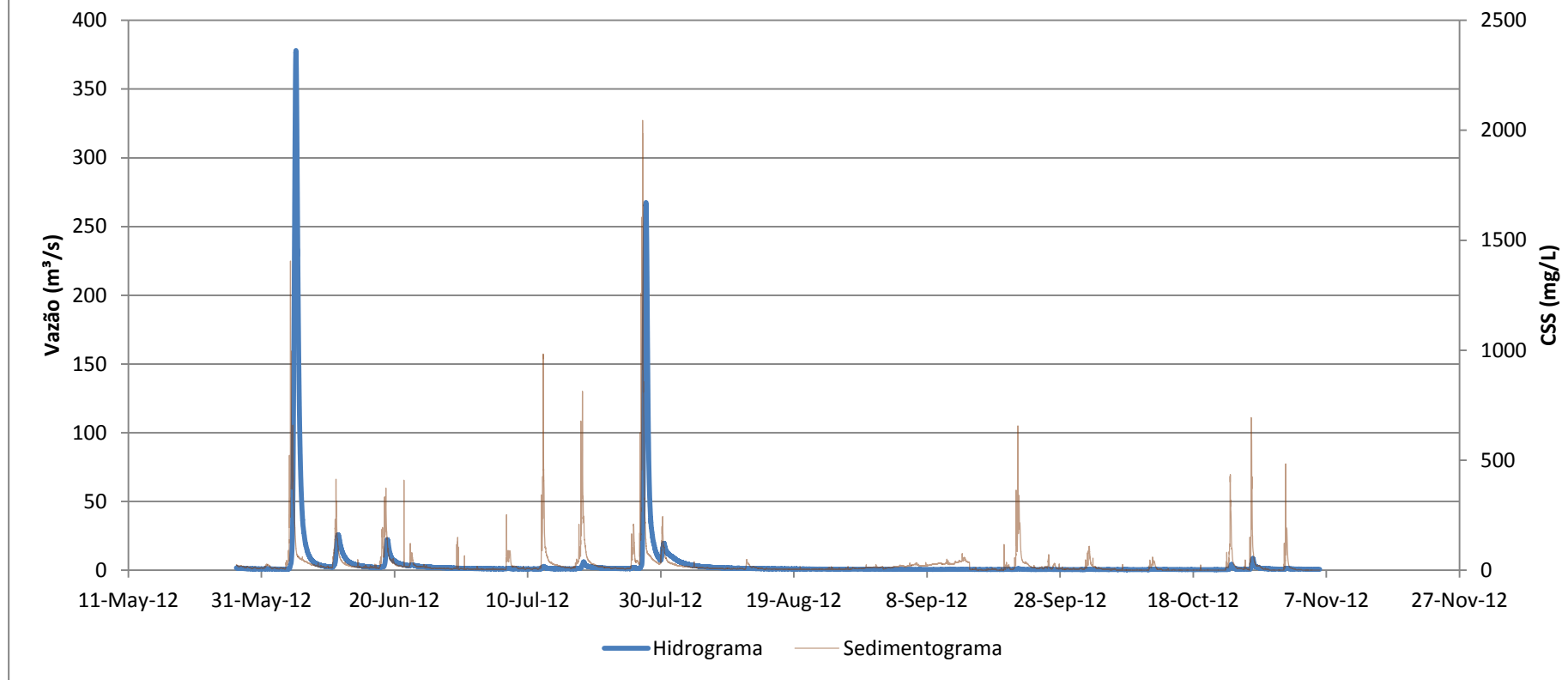
WISCHMEIER, W. H., JONHSON, C.B., CROSS, B.V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. 1971. Journal of Soil and Water Conservation, vol. 26, pp. 189-193.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington: USDA, 1978. 58p. Agriculture Handbook, 537.

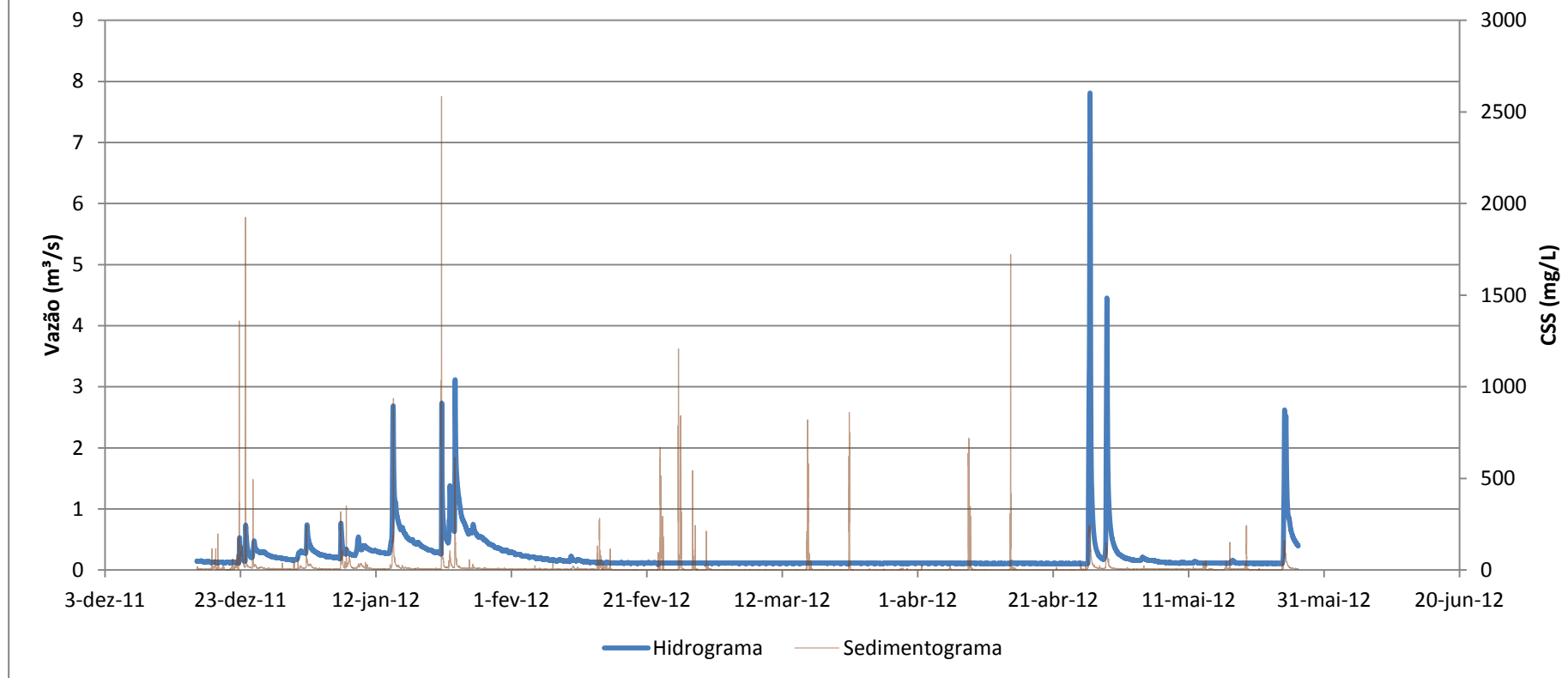
Apêndice I - Hidrossedimentogramas para cada bacia durante a série de dados



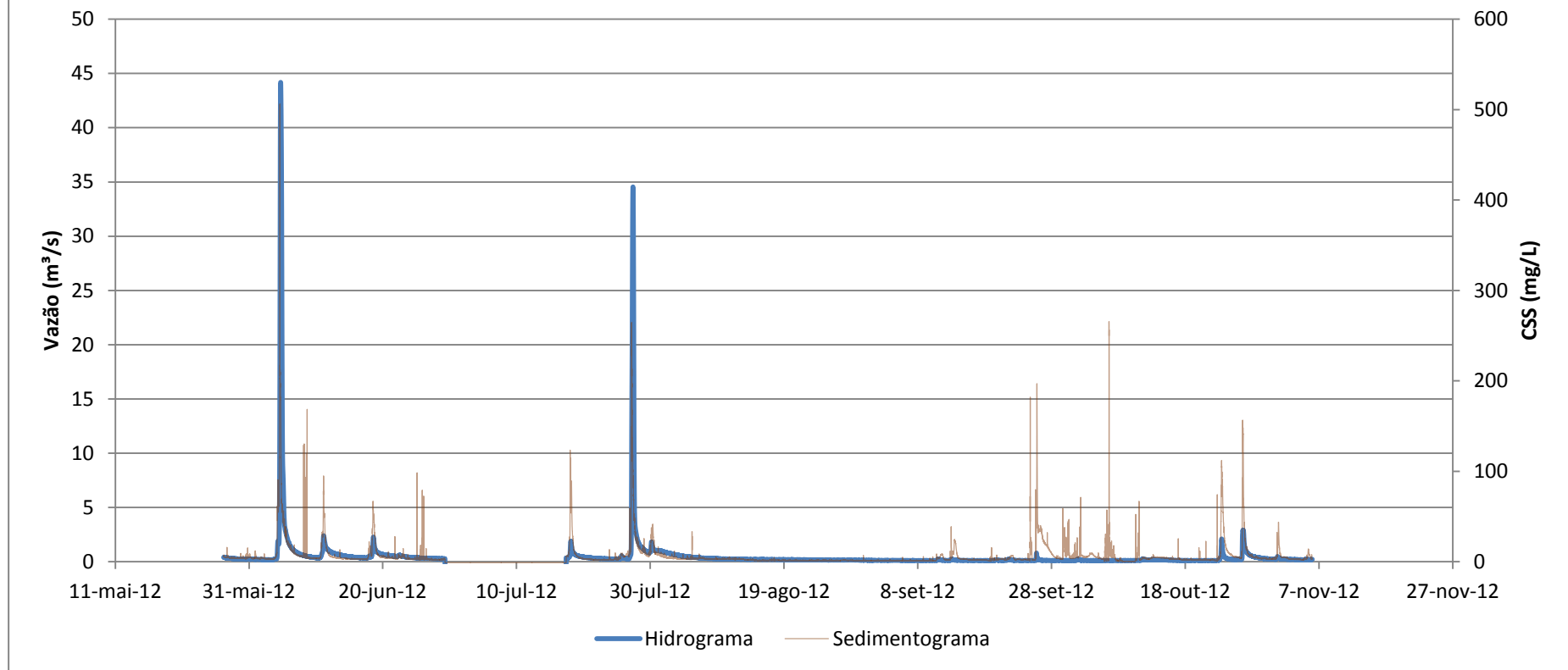
### Hidrograma RB-01 (27 maio de 2012 - 5 novembro de 2012)



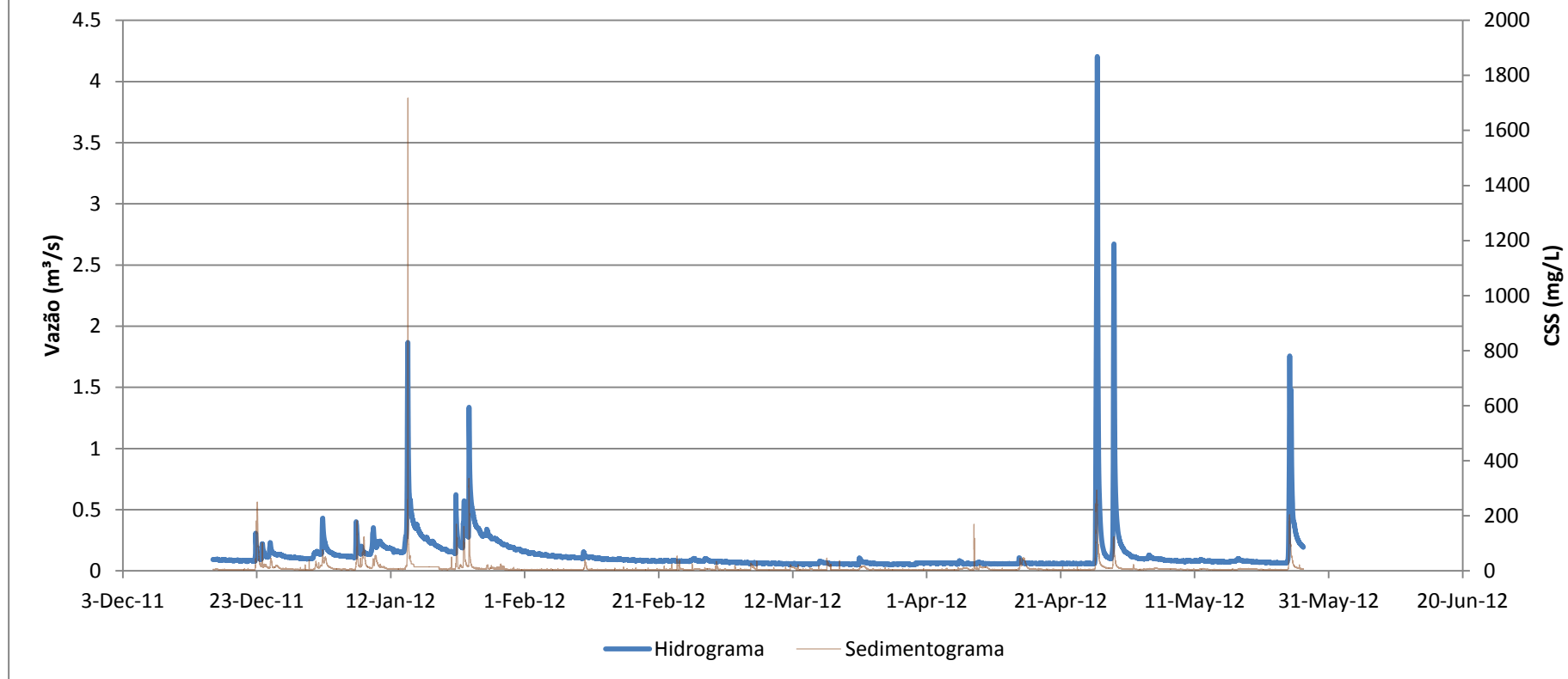
### Hidrossedimentograma RB-10 (16 dezembro de 2011 a 27 maio de 2012)



### Hidrossedimentograma RB-10 (27 maio de 2012 a 5 novembro de 2012)

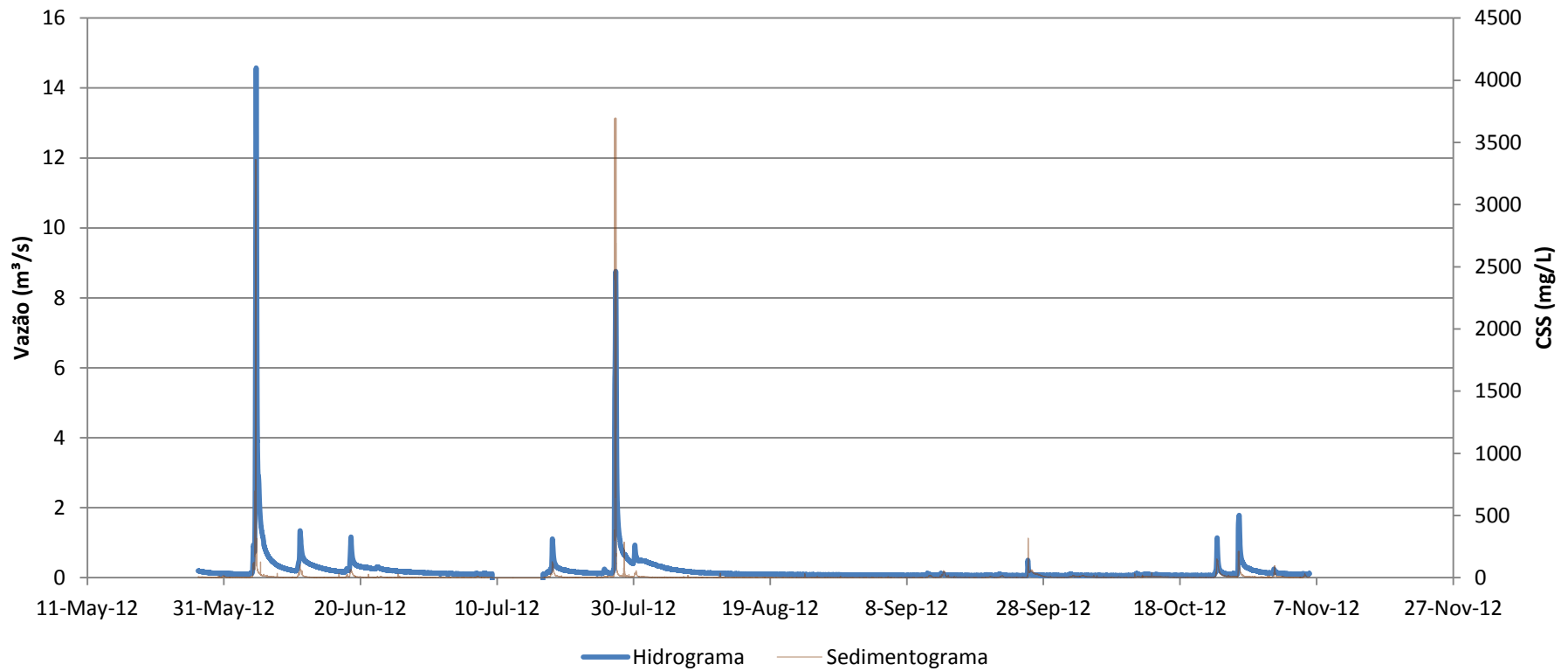


### Hidrossedimentograma RB-11 (16 dezembro de 2011 a 27 maio de 2012)

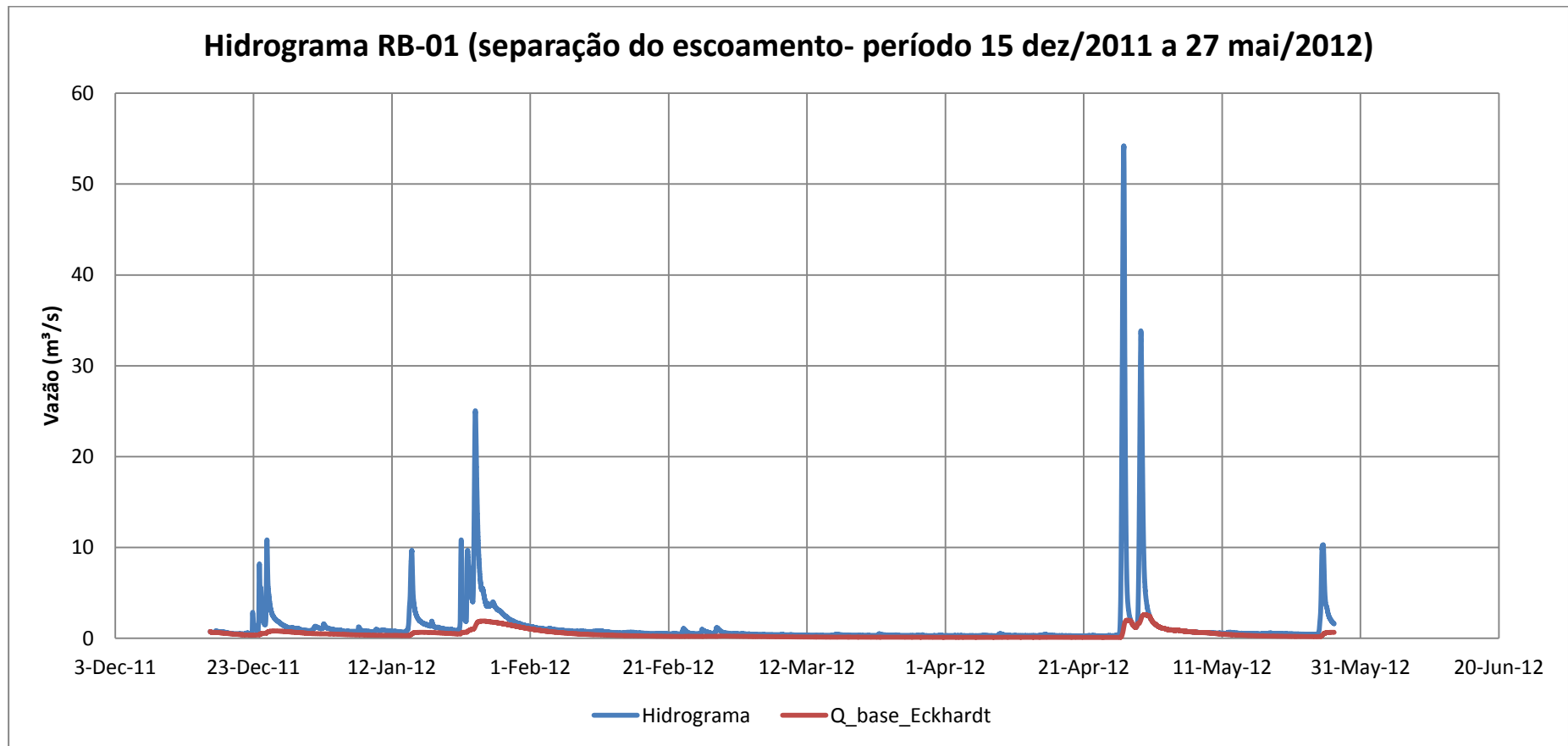




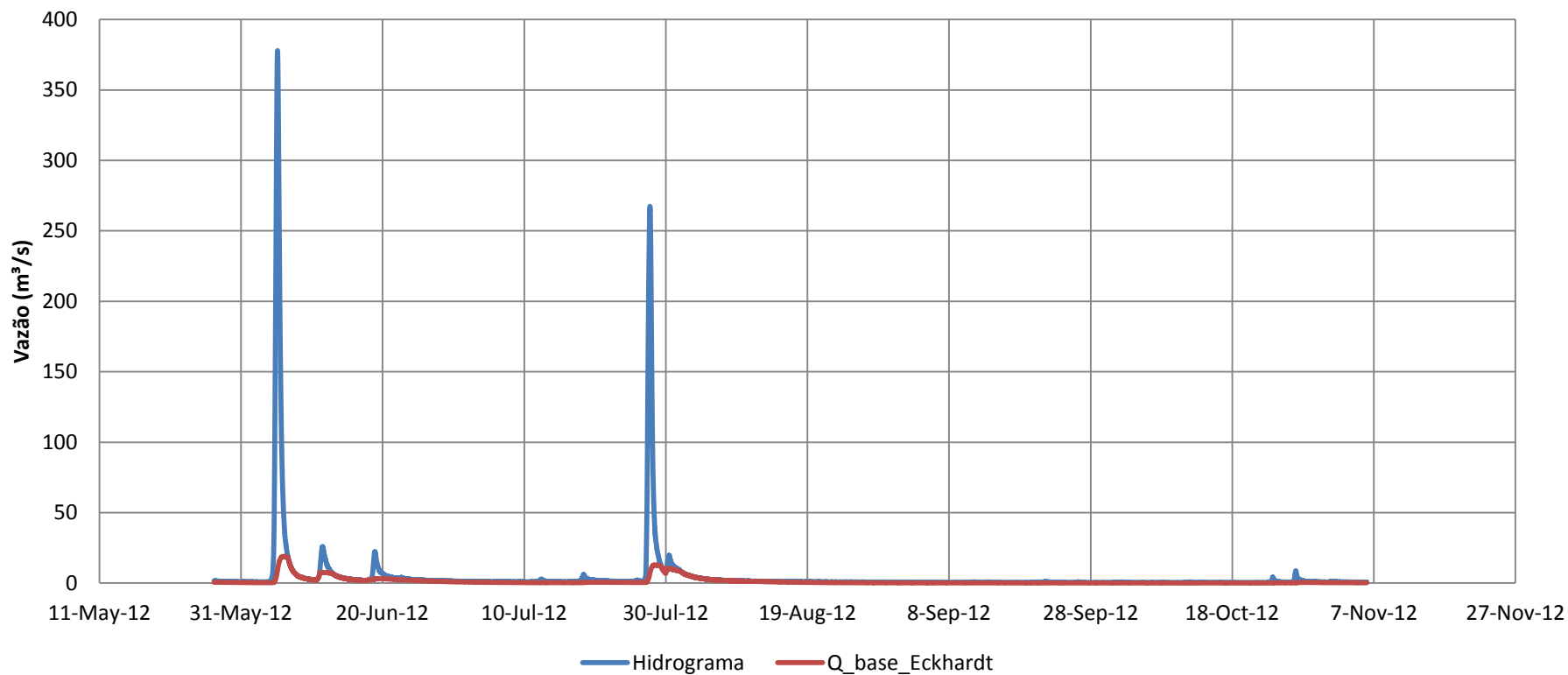
### Hidrossedimentograma RB-11 (27 maio de 2012 a 5 novembro de 2012)



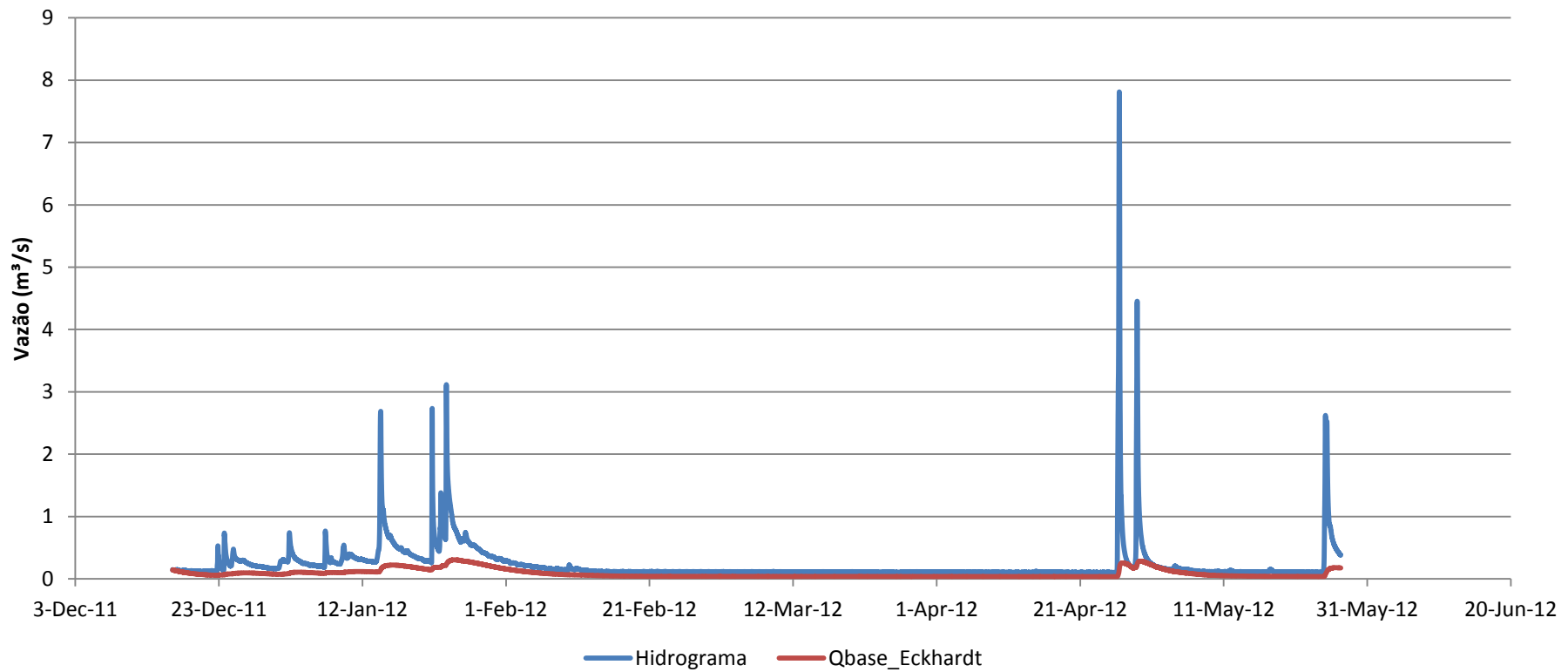
## Apêndice II - Hidrogramas e separação do escoamento para cada bacia durante a série de dados



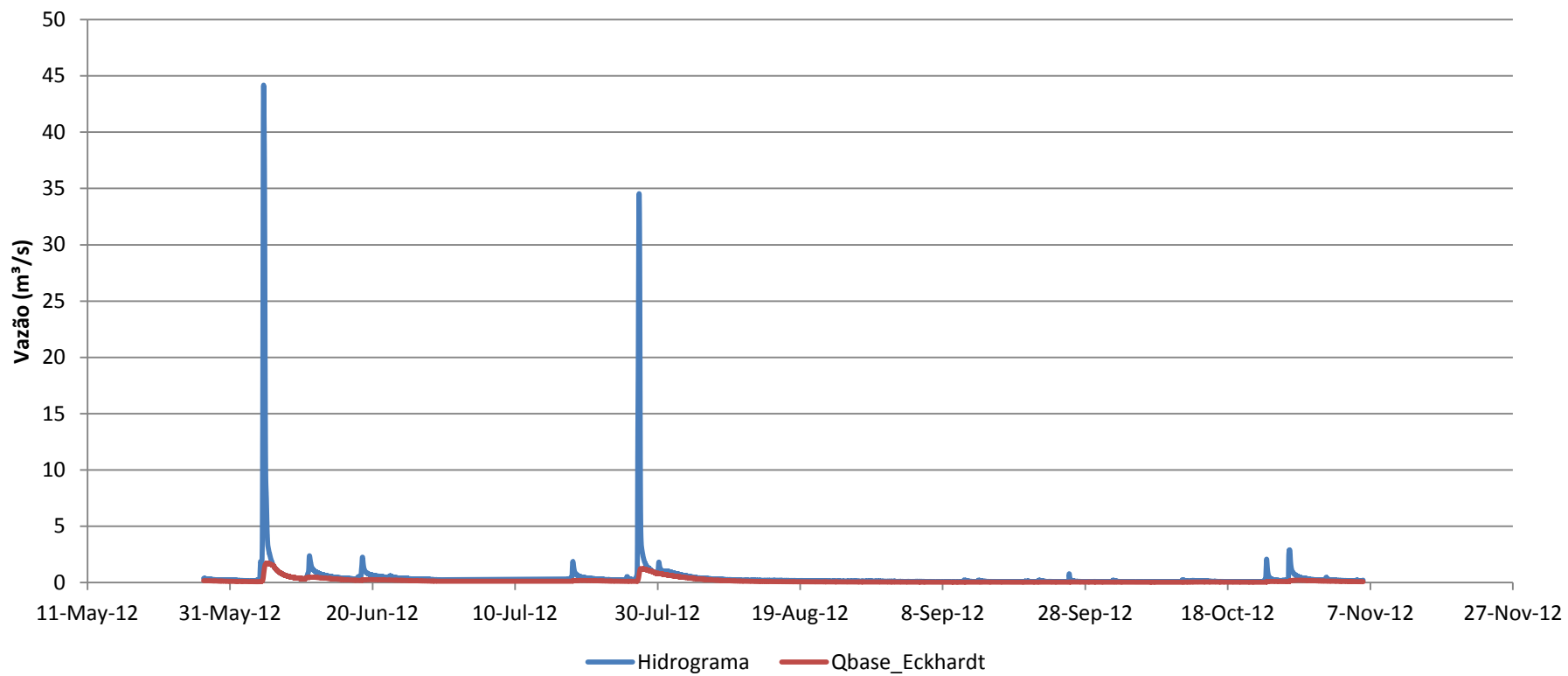
**Hidrograma RB-01 (separação do escoamento- período 27 mai/2012 a 5 nov/2012)**



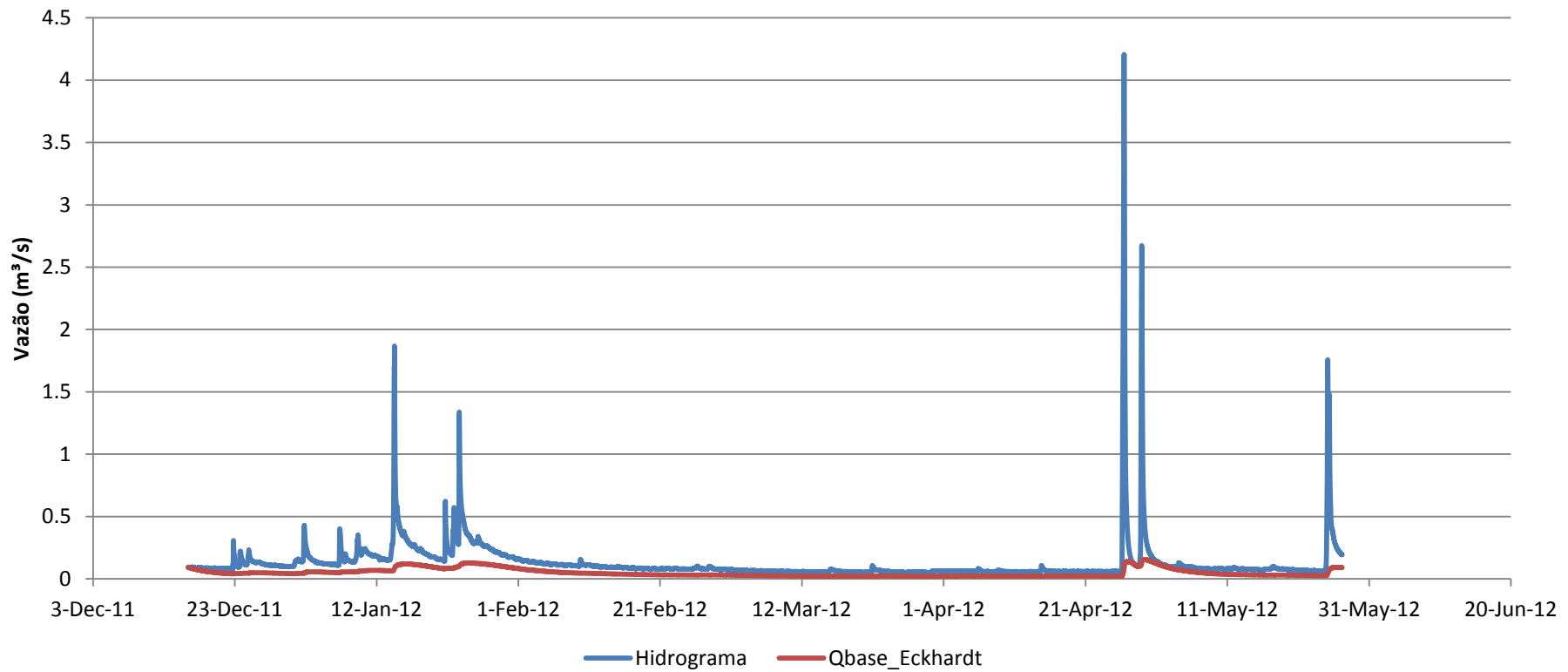
Hidrograma RB-10 (separação do escoamento- período 15 dez/2011 a 27 mai/2012)



**Hidrograma RB-10 (separação do escoamento- período 27 mai/2012 a 5 nov/2012)**



**Hidrograma RB-11 (separação do escoamento- período 15 dez/2011 a 27 mai/2012)**



**Hidrograma RB-11 (separação do escoamento- período 27 mai/2012 a 5 nov/2012)**

