

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**CARACTERIZAÇÃO HIDROSEDIMENTOMÉTRICA
DE UMA PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA E
BALANÇO SEDIMENTOMÉTRICO NO
RESERVATÓRIO DO VACACAÍ MIRIM**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Laís Coelho Teixeira

Santa Maria, RS, Brasil

2015

**CARACTERIZAÇÃO HIDROSEDIMENTOMÉTRICA
DE UMA PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA E BALANÇO
SEDIMENTOMÉTRICO NO RESERVATÓRIO DO
VACACAÍ MIRIM**

Laís Coelho Teixeira

Dissertação apresentado ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Área de concentração em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Ambiental**.

Orientador: Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva

Santa Maria, RS, Brasil

2015

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Teixeira, Laís Coelho
Caracterização hidrossedimentométrica de uma pequena
bacia hidrográfica e balanço sedimentométrico no
reservatório do Vacacaí Mirim / Laís Coelho Teixeira.-2015.
158 p.; 30cm

Orientador: João Batista Dias de Paiva
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental, RS, 2015

1. Produção de sedimentos 2. Vacacaí Mirim 3. HEC-HMS
4.0 I. Paiva, João Batista Dias de II. Título.

© 2015

Todos os direitos autorais reservados a Laís Coelho Teixeira. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: lais.c.teixeira@gmail.com

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a dissertação de Mestrado

**CARACTERIZAÇÃO HIDROSEDIMENTOMÉTRICA DE UMA
PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA E BALANÇO
SEDIMENTOMÉTRICO NO RESERVATÓRIO DO VACAÍ MIRIM**

elaborada por
Laís Coelho Teixeira

Como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Ambiental

COMISSÃO EXAMINADORA:

João Batista Dias de Paiva, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Walter Collischonn, Dr. (UFRGS)
(Examinador externo)

Débora Missio Bayer, Dr. (UFSM)
(Examinador interno)

Santa Maria, 20 de agosto de 2015.

Aos meus queridos e amados pais, José
Cláudio e Lizete, aos meus irmãos,
Cláudia, Marília, Bruno e Paula, ao meu
namorado Fernando, dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio, carinho e paciência neste momento de minha vida.

Ao meu namorado pelo carinho, amizade, apoio e muita paciência neste momento de minha vida.

Ao professor João Batista Dias de Paiva pelos ensinamentos, orientação, apoio e compreensão ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas do GHIDROS, Róbson, Osmar, Siza, Roberta, Marielle, Luiz Fernando, Gláucia, Astério pela amizade e apoio às atividades de campo.

Ao Técnico Alcides Sartori pelo apoio às atividades de campo.

Ao projeto RHIMA, financiado pela FINEP-CTHIDRO.

À FAPERGS/CAPES pela bolsa concedida para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria pelos ensinamentos ministrados no curso.

À Universidade Federal de Santa Maria pela oportunidade de realizar o mestrado na área de Engenharia Ambiental.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
Universidade Federal de Santa Maria

CARACTERIZAÇÃO HIDROSSEDIMENTOMÉTRICA DE UMA PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA E BALANÇO SEDIMENTOMÉTRICO NO RESERVATÓRIO DO VACACAÍ MIRIM

AUTORA: LAÍS COELHO TEIXEIRA

ORIENTADOR: JOÃO BATISTA DIAS DE PAIVA

Data e local da defesa: Santa Maria, 20 de agosto de 2015.

A produção de sedimentos ocasiona uma série de problemas, entre eles destacam-se assoreamento dos rios e reservatórios e contaminação das águas superficiais. Os sedimentos são resultado dos processos de erosão, transporte, depósito e compactação. Dependem das características físicas da bacia hidrográfica e do uso e ocupação do solo. Estudar a produção de sedimentos em um rio é importante para estimar a quantidade e a origem dos sedimentos transportados e depositados em uma bacia hidrográfica, podendo assim, obter conhecimento da unidade de estudo e realizar um melhor planejamento e aproveitamento dos recursos hídricos. O objetivo desta pesquisa é de caracterizar a produção de sedimentos de uma pequena bacia hidrográfica, a partir de medições de descarga líquida e sólida na seção do rio e realizar um balanço sedimentométrico no reservatório do Vacacaí Mirim no município de Santa Maria. A metodologia se baseou em duas etapas: primeira etapa foi à realização da caracterização sedimentométrica da área de estudo com o monitoramento contínuo das vazões e sedimentos na estação fluviossedimentométrica João Goulart no período de janeiro a novembro de 2014 e na determinação da concentração de sedimentos e caracterização das amostras em laboratório; a segunda etapa foi à realização do balanço sedimentométrico no reservatório com o auxílio do programa de modelagem HEC-HMS 4.0 onde foram verificados as entradas, armazenamento e saída de sedimentos no reservatório Vacacaí Mirim que influencia a área de estudo. Os resultados obtidos para o monitoramento hidrossedimentométrico foram satisfatórios, obtendo uma curva-chave com coeficiente de determinação de 0,96; as curvas sedimentométricas variando de 0,93 a 0,98; a relação da concentração de sedimentos em suspensão e a turbidez foi de 0,84 sendo consideradas aceitáveis; as características granulométricas do material em suspensão foi predominante o silte e para o material em arraste foi à areia. Para o balanço sedimentométrico a calibração hidrológica do modelo obteve-se um Nash-Sutcliffe entre 0,13 a 0,53 e na validação de 0,44; as considerações observadas no balanço de sedimentos no reservatório foram que todo o sedimento que entra fica retido no reservatório e é produzido mais sedimentos a jusante do mesmo que chega até o exutório da bacia.

Palavras-chave: Produção de sedimentos. Vacacaí Mirim. HEC-HMS 4.0.

ABSTRACT

Master Thesis
Post-graduation Program in Environmental Engineering
Federal University of Santa Maria

CHARACTERIZATION HYDROSSEDIMENTOLÓGICAL OF THE SMALL WATERSHED AND SEDIMENT BUDGETS IN RESERVOIR VACACAÍ MIRIM

AUTHOR: LAÍS COELHO TEIXEIRA

ADVISER: JOÃO BATISTA DIAS DE PAIVA

Date and local of the defense: Santa Maria, August 20th, 2015.

The sediment yield causes a number of problems, and among them stands out silting of rivers and reservoirs, and contamination of surface water. Sediments result from the processes of erosion, transport, storage and compression. They depend on the physical characteristics of the watershed, as well as soil use and land cover. To study the sediment yield of a river is important to estimate the amount and origin of the sediments transported and deposited in a watershed. Therefore, it is possible to obtain knowledge about the unit of study, which leads to better planning and use of water resources. From liquid and solid discharge measurements in a river section, and conducting a sedimentometrical balance in Vacacaí Mirim reservoir, located at Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brazil, the objective of this research is to characterize the sediment yield of a small watershed. The methodology was based on two stages: the first one was about the sedimentometrical characterization of the study area, and it was carried out between January and November of 2014, with the continuous monitoring of flow and sediments in fluviossedimentometrical station João Goulart, whose laboratory samples were also characterized and had their sediment concentration determined; the second stage was about the execution of sedimentometrical balance in the reservoir with the help of HEC-HMS 4.0 modeling program. Sediment entries, storage and output were checked in Vacacaí Mirim reservoir, which influences the study area. The results for the hydrossedimentometrical monitoring were satisfactory, getting a key curve with determination coefficient of 0.96; sedimentometrical curves ranged from 0.93 to 0.98; concentration ratio between suspended sediment and turbidity was 0.84, being considered acceptable; particle size characteristics were predominantly silt, for suspended material, and sand, for dragged material. Balance calibration for sedimentometrical hydrologic model gave a Nash-Sutcliffe between 0.13 to 0.53 and 0.44 in validation; about reservoir sediments balance, it was noted and therefore considered that all sediment that enters the reservoir is retained and more sediment is produced downstream thereof mouth of the river it reaches the watershed.

Key-words: Sediment yield. Vacacaí Mirim. HEC-HMS 4.0.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico referente à representação dos efeitos da concentração de sedimentos em suspensão e do tamanho de partículas sobre o sinal de turbidez.....	30
Figura 2 – Área de trabalho do sistema de modelagem HEC-HMS versão 4.0.....	33
Figura 3 – Componente de Sedimentos ativado no modelo de bacia (3a) e Componente de Sedimentos aberto com os métodos principais e parâmetros de sedimentos (3b).....	34
Figura 4 – Fluxograma dos métodos de cálculo utilizado no elemento sub-bacia do programa HEC-HMS 4.0.	35
Figura 5 – Fluxograma dos métodos de cálculo no elemento rio do Sistema de Modelagem HEC-HMS 4.0.	36
Figura 6 – Fluxograma dos métodos de cálculos do elemento reservatório no Sistema de Modelagem HEC-HMS 4.0.	37
Figura 7 – Fluxograma dos métodos de cálculo do modelo meteorológico do Sistema de Modelagem HEC-HMS 4.0.	37
Figura 8 – Modulo das especificações de controle para a inicialização da simulação do Sistema de Modelagem HEC-HMS 4.0.	38
Figura 9 – Mapa de localização da sub-bacia hidrográfica João Goulart.	42
Figura 10 – Vista da Estação Fluviossedimentométrica João Goulart em período sem precipitação (A) e em período chuvoso (B).	42
Figura 11 – Mapa do uso e ocupação do solo da área em estudo da estação fluviossedimentométrica João Goulart.	44
Figura 12 – Mapa de classificação do solo na bacia hidrográfica João Goulart.	45
Figura 13 – Linígrafo digital, de bóia, com datalogger.....	46
Figura 14 – Medição com o molinete fluviométrico marca HC, n. 128.000 (A), vista aproximada do molinete fluviométrico no campo (B).....	47
Figura 15 – Medição com o micromolinete marca A-OTT, Hélice 3.	48
Figura 16 – Medição de vazão na seção do rio com o método acústico ADP. Ponto de partida da travessia do ADP na margem direita (A) e travessia do ADP até a margem esquerda da seção (B).	49
Figura 17 – Sonda de turbidez DTS-12 (A) e Datalogger modelo Axiom H2 (B).....	50
Figura 18 – Amostrador ISCO 3700 (A) e ISCO 3700 aberto com as 24 garrafas (B).	51
Figura 19 – Amostrador Helley-Smith.....	52
Figura 20 – Sub-bacias hidrográficas correspondente ao balanço sedimentométrico no reservatório do Vacacaí Mirim.....	54
Figura 21 – Esquematização das áreas que correspondem ao balaço sedimentométrico no reservatório do Vacacaí Mirim.....	55
Figura 22 – Precipitações registradas nas estações pluviométricas Rancho do Amaral e Sítio do Maciel nos períodos de janeiro de 2014 a dezembro de 2014.	70
Figura 23 – Curva-chave da estação João Goulart.	72
Figura 24 – Curva-chave de sedimentos em suspensão da seção transversal da Estação João Goulart.....	73
Figura 25 – Curva-chave de sedimentos em suspensão da seção transversal da estação fluviossedimentométrica João Goulart.	74

Figura 26 – Correlação da Css e a Turbidez no evento do dia 2 de setembro de 2014 na Estação João Goulart.	75
Figura 27 – Correlação da Css e a Turbidez do evento do dia 12 de setembro de 2014 na Estação João Goulart.	75
Figura 28 – Correlação da Css e a Turbidez do evento do dia 30 de setembro de 2014 na Estação João Goulart.	76
Figura 29 – Correlação da Css e a Turbidez do evento do dia 6 de outubro de 2014 na Estação João Goulart.	77
Figura 30 – Correlação da Css e a Turbidez na Estação fluviossedimentométrica João Goulart.	78
Figura 31 – Curva granulométrica dos sedimentos em suspensão do evento de 23/07/14.	81
Figura 32 – Curva granulométrica dos sedimentos em suspensão do evento de 02/09/14.	81
Figura 33 – Curva granulométrico dos sedimentos em suspensão do evento de 12/09/14.	82
Figura 34 – Curva granulométrica dos sedimentos em suspensão do evento de 06/10/14.	82
Figura 35 – Curva granulométrica dos sedimentos em suspensão do evento de 17/10/14.	83
Figura 36 – Curva granulométrica dos sedimentos de leito do evento de 23/07/14.	85
Figura 37 – Curva granulométrica dos sedimentos de leito do evento de 02/09/14.	85
Figura 38 – Hidrograma de resposta da pré-calibração da sub-bacia Menino Deus 4 (B1) no período de 02 de setembro de 2011 a 05 de janeiro de 2012 com intervalos diários.	87
Figura 39 – Hidrograma de resposta da pré-calibração da sub-bacia Menino Deus 2 (B2) no período de 02 de setembro de 2011 a 05 de janeiro de 2012 com intervalos diários.	88
Figura 40 – Hidrograma de resposta da pré-calibração da sub-bacia Sítio do Tio Pedro (B4) no período de 17 de julho a 28 de novembro de 2003 intervalos diários.	89
Figura 41 – Hidrograma de resposta da pré-calibração da sub-bacia João Goulart (B7) no período de 30 de janeiro a 16 de junho de 2014 intervalos diários.	90
Figura 42 – Hidrograma de resposta da calibração do modelo hidrológico no período de 30 de janeiro a 10 de novembro de 2014 com intervalos diários.	92
Figura 43 – Hidrograma de resposta da validação do modelo hidrológico no período de 17 de junho a 10 de novembro de 2014 com intervalo diário.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Funções de transporte potencial para calcular a quantidade de sedimentos transportada em um escoamento com seus respectivos tipos e métodos.....	34
Tabela 2 – Uso do solo da área em estudo da estação fluviossedimentométrica João Goulart.....	43
Tabela 3 – Classificação do solo na área em estudo da estação fluviossedimentométrica João Goulart.	45
Tabela 4 – Identificação das áreas correspondentes ao balanço sedimentométrico no reservatório do Vacacaí Mirim.....	55
Tabela 5 – Características físicas das sub-bacias.	56
Tabela 6 – Classificação pedológica dos solos das sub-bacias.....	57
Tabela 7 – Uso e ocupação do solo das sub-bacias.....	58
Tabela 8 – Métodos de cálculos da simulação do balanço sedimentométrico no reservatório.	63
Tabela 9 – Medições da descarga líquida com seus valores de cota e vazões observadas na seção João Goulart no período de fevereiro a novembro de 2014.	71
Tabela 10 –Classificação granulométrica dos sedimentos em suspensão do evento de 23/07/14 conforme a classificação simplificada da ABNT.	79
Tabela 11 –Classificação granulométrica dos sedimentos em suspensão do evento de 02/09/14 conforme a classificação simplificada da ABNT.	79
Tabela 12 –Classificação granulométrica dos sedimentos em suspensão do evento de 12/09/14 conforme a classificação simplificada da ABNT.	80
Tabela 13 –Classificação granulométrica dos sedimentos em suspensão do evento de 06/10/14 conforme a classificação simplificada da ABNT.	80
Tabela 14 –Classificação granulométrica dos sedimentos em suspensão do evento de 17/10/14 conforme a classificação simplificada da ABNT.	80
Tabela 15 –Classificação granulométrica do material de leito do evento de 23/07/14 conforme a classificação simplificada da ABNT.	84
Tabela 16 –Classificação granulométrica do material de leito do evento de 02/09/14 conforme a classificação simplificada da ABNT.	84
Tabela 17 –Resultados simulados de volume comparados com o observado e o coeficiente de desempenho do modelo para a pré-calibração, calibração e a validação do modelo.	94
Tabela 18 –Parâmetros hidrológicos calibrados.	95
Tabela 19 –Continuação dos parâmetros hidrológicos calibrados.	96
Tabela 20 –Continuação dos parâmetros hidrológicos calibrados.	97
Tabela 21 –Resultados da primeira simulação do balanço d sedimentos no reservatório do Vacacaí Mirim.....	98
Tabela 22 –Resultados da segunda simulação do balanço de sedimentos no reservatório do Vacacaí Mirim.....	99

LISTA DE APÊNDICES E ANEXO

Apêndice A – Dados pareados adicionados no programa HEC-HMS 4.0.....	111
Apêndice B – Relatório das medições de vazões realizadas com os molinetes	115
Apêndice C – Dados observados das concentrações de sedimentos em suspensão na Estação Fluviossedimentométrica João Goulart.	135
Apêndice D – Parâmetros da MUSLE utilizado no modelo HEC-HMS 4.0.....	145
Anexo A – Determinação dos parâmetros da MUSLE: K, Ls, C e P	151

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivo geral.....	22
1.2	Objetivos específicos.....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Produção de sedimento.....	23
2.2	Amostragem de sedimentos em suspensão.....	25
2.3	Métodos alternativos na estimativa da produção de sedimentos.....	26
2.3.1	ISCO.....	26
2.3.2	Sensor óptico de turbidez.....	28
2.4	Relação da turbidez com a concentração de sedimentos em suspensão.....	29
2.5	Balanco sedimentométrico no reservatório.....	30
2.6	Sistema de Modelagem Hidrológica HEC-HMS Versão 4.0.....	32
2.6.1	Modelo bacia hidrográfica.....	33
2.6.2	Modelo meteorológico.....	37
2.6.3	Especificações de controle.....	37
2.6.4	Aplicações do Sistema de Modelagem HEC-HMS 4.0.....	38
3	MATERIAL E MÉTODOS	41
3.1	Monitoramento	41
3.1.1	Área de estudo.....	41
3.1.2	Caracterização da área de estudo.....	43
3.1.2.1	Uso e ocupação do solo.....	43
3.1.2.2	Classificação do solo.....	44
3.1.3	Medidas pluviométricas.....	46
3.1.4	Monitoramento de nível do rio.....	46
3.1.5	Medições de descarga líquida.....	47
3.1.5.1	Método convencional.....	47
3.1.5.2	Método acústico.....	48
3.1.6	Medições de sedimentos.....	49
3.1.6.1	Monitoramento da turbidez.....	49
3.1.6.2	Amostrador ISCO 3700.....	50
3.1.6.3	Amostragens de material de arraste de fundo.....	51
3.1.7	Análises de laboratório.....	52
3.2	Balanco sedimentométrico no reservatório	52
3.2.1	Sub-bacias hidrográficas correspondentes ao balanço sedimentométrico no reservatório do Vacacaí Mirim.....	53
3.2.1.1	Caracterização das sub-bacias.....	56
3.2.2	Reservatório do Vacacaí Mirim.....	58
3.2.3	Discretização dos dados de entrada no modelo HEC-HMS.....	59
3.2.3.1	Série de Precipitação.....	59
3.2.3.2	Série de Evapotranspiração.....	60
3.2.3.3	Série de Vazão.....	60
3.2.3	Calibração hidrológica do modelo HEC-HMS.....	62
3.2.3.1	Otimização das sub-bacias.....	62
3.2.4	Simulação do balanço sedimentométrico com HEC-HMS.....	63

3.2.4.1	Desempenho do modelo	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
4.1	Precipitação	69
4.2	Medição da descarga líquida na estação	70
4.3	Medição da descarga sólida em suspensão	72
4.4	Correlação da Css e Turbidez	74
4.5	Granulometria dos sedimentos	78
4.5.1	Sedimentos em suspensão	78
4.5.2	Sedimento de fundo	83
4.6	Calibração do modelo	85
4.7	Simulação do balanço sedimentométrico no reservatório	97
4.7.1	Entrada, armazenamento e saída de sedimentos no reservatório	98
5	CONCLUSÕES	101
	REFERÊNCIAS	103
	APÊNDICES	109
	ANEXO	149

1 INTRODUÇÃO

A expansão urbana e populacional e a intensiva agricultura em áreas rurais têm ocasionado alterações significativas no meio ambiente. Uma das conseqüências dessas modificações é a perda da qualidade dos recursos hídricos por diferentes fatores, dentre eles, a erosão das margens dos cursos de água. Em detrimento a isso ocorre um aumento na produção, transporte e deposição de sedimentos em uma bacia hidrográfica, formada por um conjunto de recursos hídricos, acarretando no assoreamento de rios, assoreamento de reservatórios de abastecimento de água e degradação das águas superficiais (CARVALHO, 2008). Nos estudos hidrossedimentométricos em uma bacia hidrográfica, ou seja, da produção de sedimentos, muitas variáveis são estudadas como a precipitação, a descarga líquida, a descarga sólida de sedimentos em suspensão, de leito e de arraste, e a concentração de sedimentos em suspensão. Para isso é necessário a aplicação de métodos que obtenham dados representativos dos processos hidrossedimentológico e forneçam informações sobre suas características, quantidade de sedimentos transportados e indicação de fatores que influenciam na produção de sedimentos na região de inserção dessa bacia.

Porém, o custo do monitoramento convencional de aporte de sedimentos, realizado por um hidrometrista é relativamente alto para manter continuamente. Segundo Paiva, Paiva e Paranhos (2000), no Brasil há um grande déficit de dados hidrológicos e sedimentológicos para as pequenas bacias devido a este custo, por isso, são utilizados modelos hidrológicos e métodos alternativos para a estimativa do transporte de sedimentos para suprir essa carência de informações (LOPES et al., 2011).

Os modelos hidrológicos são ferramentas importantes no auxílio dos estudos e compreensão dos processos de produção de sedimentos, porém, os resultados estimados neste modelo nem sempre representam a realidade local das bacias. Sendo assim, é de grande importância ampliar essas informações “in loco”, ou seja, obter uma série de dados contínuos para a calibração dos métodos e modelos de estimativa de produção de sedimentos (PAIVA; PAIVA; PARANHOS, 2000; LOPES et al., 2011).

Portanto, o monitoramento do profissional a campo e a aplicação de um modelo hidrológico caminham conjuntamente para obter um melhor entendimento do comportamento hidrossedimentológico em uma unidade hidrográfica. Esse diagnóstico é de fundamental importância para um melhor planejamento e gestão dos recursos hídricos em uma bacia hidrográfica (PAIVA; PAIVA; PARANHOS, 2000; MINELLA, 2004; MINELLA; MERTEN, 2011).

1.1 Objetivo geral

O objetivo desta pesquisa é de caracterizar a produção de sedimentos de uma pequena bacia hidrográfica localizada no município de Santa Maria (RS), a partir de medições de descarga líquida, sólida e de turbidez na seção do rio e realizar um balanço sedimentométrico no reservatório do Vacacaí Mirim em Santa Maria (RS).

1.2 Objetivos específicos

- Obter uma curva-chave através de medições de descarga líquida na seção de estudo.
- Obter uma curva-chave de sedimentos em suspensão através de medições de descarga sólida de sedimentos em suspensão na seção de estudo.
- Relacionar a concentração de sedimentos em suspensão obtidos através do amostrador automático ISCO 3700 com a turbidez registrada na sonda.
- Obter características granulométricas através de amostragens de sedimentos em suspensão e de arraste na seção de estudo.
- Determinar o balanço sedimentométrico no reservatório através do modelo hidrológico HEC-HMS versão 4.0 e verificar com a produção de sedimento a jusante do reservatório observada na seção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Produção de sedimento

A produção de sedimentos é o resultado da quantidade de material erodido na bacia vertente e no canal fluvial e transferido até uma seção do canal fluvial (WALLING, 1983; CARVALHO, 2008), e incluem tanto os sedimentos que são transportados em suspensão quanto os sedimentos de leito (CARDOSO, 2013). O aporte de sedimentos na bacia hidrográfica depende de inúmeros fatores que regulam os processos de produção e de transporte de sedimentos das áreas de vertente para a calha do rio (SANTOS, 2013). É entendido, que os fatores que interferem na produção de sedimentos são: o clima, as características fisiográficas e o uso e manejo do solo (MORGAN, 2005), e são, segundo Minella (2007), influenciados pela sua magnitude, ou seja, pela intensidade com que o solo é desagregado pela ação da precipitação e do escoamento superficial.

A relação do comportamento do sedimento e bacia hidrográfica depende diretamente das características da mesma, como tipo de rocha e solo, cobertura vegetal, declividade e regime de chuvas (CARVALHO, 2008).

O fator clima influencia no aporte de sedimento através do regime de chuvas, sendo diretamente proporcional a intensidade e frequência da ocorrência da mesma. Podendo ser alterado pelos fenômenos climáticos como El niño e La niña, que tem influencia principalmente no estado do Rio Grande do Sul (RS), os quais ocasionam precipitações acima do normal em anos de El Niño e abaixo do normal no ano de La Niña (PAULA et al., 2010). Paula et al. (2010), constataram que o potencial erosivo das chuvas no município de Santa Maria (RS) é intensificado pelo fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS). O ENOS caracteriza-se por alterações ou anomalias da temperatura da superfície do mar (TSM) na região do Pacífico Equatorial, próximo à costa oeste da América do Sul (GRIMM et al., 1998), ocasionando um aumento significativo das intensidades das precipitações nos eventos de chuva e maior frequência das mesmas. Portanto, em áreas desprotegidas de vegetação e com

maior degradação do solo, sofre maior influência deste fenômeno ocasionando um aumento no aporte de sedimentos nas bacias hidrográficas na região atingida.

As características fisiográficas são fatores que determinam a capacidade de transferência dos sedimentos até a calha principal da bacia hidrográfica. São características fisiográficas: a declividade da bacia, as características da rede de drenagem, índice de forma da bacia e o tipo de solo (MINELLA; MERTEN, 2011). A construção de um reservatório na bacia hidrográfica também influencia neste transporte de sedimentos dentro da bacia, ou seja, um barramento no rio acarretará na contenção e deposição dos sólidos que provem dos afluentes diminuindo a concentração a jusante do mesmo (CARVALHO, 2008). Isto se deve a capacidade que o reservatório tem de reter os sedimentos, ou seja, a eficiência de retenção do reservatório. Essa eficiência vai depender do seu tamanho, podendo reter até 100% dos sedimentos de leito e 95% dos sedimentos em suspensão (MINEAR; KONDOLF, 2009).

O fator uso e manejo do solo compreendem as alterações da paisagem que o homem realizou durante anos, como, a retirada da vegetação para a agricultura e a construção de edificações, estradas e etc. Essas alterações interferem nas intensidades e magnitudes dos fatores anteriores (clima e características fisiográficas) (HOGAN et al., 2014; MINELLA; MERTEN, 2011). A produção de sedimentos oscila ao longo do tempo, devido à ação destas alterações, podendo ser regulares ou intensas na bacia hidrográfica atingida (WARRICK et al., 2013).

Para a melhor compreensão da produção de sedimentos em uma bacia, são realizados estudos hidrossedimentométricos que analisam a resposta dos efeitos de todos os fatores mencionados em uma bacia hidrográfica.

A metodologia utilizada no monitoramento consiste na obtenção de uma série temporal de dados de precipitação, vazão e concentração de sedimentos que possibilita o cálculo do fluxo de sedimentos. Esse fluxo é caracterizado pela descarga sólida em suspensão (massa por unidade de tempo) e a produção de sedimentos, que é a integração do fluxo no tempo (MINELLA; MERTEN, 2011).

2.2 Amostragem de sedimentos em suspensão

As medições de sedimentos em suspensão podem ser realizadas de forma direta (quantificação da concentração de sedimentos no local) ou indiretamente (quantificação da concentração de sedimentos em laboratório através da coleta de amostras de água mais sedimentos no local) (CARVALHO, 2008).

Os equipamentos para as medições indiretas da descarga sólida em suspensão são divididos em: amostradores instantâneos, amostradores por integração e amostradores por bombeamento (CARVALHO, 2008).

- Os amostradores instantâneos são os que coletam a mistura de água mais sedimentos pelo fechamento instantâneo de dispositivos nas extremidades do recipiente.
- Os amostradores por integração são os que coletam a mistura de água mais sedimentos através de um bico pequeno, por um determinado tempo acumulando-as em um recipiente. Podem ser pontual, realizando a coleta da amostra em único ponto da vertical escolhida da seção transversal do curso d'água; ou integradores na vertical, fazendo a coleta da amostra movendo o amostrador com uma velocidade de transito uniforme pela vertical.
- Os amostradores por bombeamento são os que retiram a amostra através da ação de uma bomba que faz o movimento de sucção para coletar a mistura de água mais sedimentos. Podem ser pontuais ou integradores na vertical.

As medições diretas de concentração de sedimentos em suspensão são feitas pelos processos pontuais e instantâneos utilizando equipamentos nucleares, ótico-eletrônicos, ultra-sônicos óticos, ultra-sônico de dispersão e ultra-sônico Doppler de perfilagem (ADCP) ou a *laser* (CARVALHO, 2008). Sendo o mais utilizado para medições diretas e pontuais o equipamento ótico-eletrônico que mede a turbidez da água.

2.3 Métodos alternativos na estimativa da produção de sedimentos

O monitoramento *in situ* da descarga sólida requer tempo e dinheiro para ser realizado continuamente, e muitas vezes, ocorrem problemas em grandes eventos de chuva, como o transbordamento da calha do rio dificultando a execução da medição da descarga sólida em suspensão para os hidrometristas (LOPES et al., 2011). Também há uma necessidade de obter maior número de séries de dados para as estimativas de produções de sedimentos em uma bacia hidrográfica, desta forma, procuraram-se novos métodos que registrassem continuamente ao longo do tempo a dinâmica do transporte de sedimentos em suspensão em uma bacia hidrográfica (WALLING; COLLINS, 2000). Portanto, surgiram novos equipamentos para suprir essas necessidades e realizar as medições mais frequentes das concentrações de sedimentos (CSS) como o sensor ótico de turbidez (exemplo, turbidímetro DTS12), amostrador ISCO e o ADP (“Acoustic Doppler Profiler”).

2.3.1 ISCO

O amostrador ISCO faz amostragens por bombeamento automático de medições indiretas e pontuais. É composto de 24 garrafas com capacidade de 1000 mL, contendo uma bomba de sucção conectada a uma mangueira que vai até a seção do rio, que ao succionar coleta a mistura de água mais sedimentos para dentro das garrafas em um intervalo pré-determinado (TELEDYNE ISCO, 2013).

Este amostrador tem como uma das principais vantagens de sua funcionalidade a maior representatividade do evento de chuva em pequenas bacias, pois nestas bacias o tempo de retorno é relativamente muito pequeno, sendo de até 40 minutos, o que dificulta nas amostragens tradicionais com o amostrador USDH-48. Assim, conseguindo maior número de amostras em um curto intervalo de tempo (LOPES et al., 2011).

O amostrador pontual ISCO esta sendo bastante utilizado nas pesquisas hidrossedimentológicas de diversos autores; dentre os brasileiros que utilizaram este

equipamento na coleta de sedimentos em suspensão, como por exemplo, Lopes et al. (2011), Pereira (2011), Alésio, Paiva e Paiva (2012) e Grutka (2013).

Pereira (2011) realizou estudos em duas Bacias experimentais, Rancho do Amaral e Rincão do Soturno, localizadas no município de Santa Maria (RS) e afirmou que a utilização do amostrador ISCO para a coleta de sedimentos em suspensão apresentou bons resultados, porém não se podem descartar as medições convencionais com o amostrador USDH-48 afim de comparação.

Alésio, Paiva e Paiva (2012) realizaram estudos nas mesmas bacias experimentais que Pereira; comparando as equações definidas através de amostras coletadas com o amostrador ISCO e com o amostrador USDH-48, dentro da amplitude de $0,1\text{m}^3/\text{s}$ a $2,3\text{ m}^3/\text{s}$, concluíram que a equação encontrada das amostras coletadas com o ISCO subestimou em 33% os valores quando comparada com os valores oriundos da equação dos dados medidos com o amostrador USDH-48. Assim, salientaram que há uma heterogeneidade da distribuição de sedimentos ao longo da seção, podendo haver a necessidade da coleta de sedimentos das duas formas automática e manual na seção do rio.

Lima et al. (2010), realizaram em seus estudos na Bacia Experimental do Alto Rio Jardim no Distrito Federal a comparação entre as concentrações médias de sedimentos em suspensão obtidas com o amostrador por integração na vertical USDH 48 e com o amostrador pontual desenvolvido pela Embrapa Cerrados. Essa comparação resultou em uma boa correlação, com coeficiente de determinação R^2 igual a 1, indicando que a variabilidade dos resultados obtidos com o amostrador pontual é possível de ser utilizada para explicar a variabilidade dos dados médios com o amostrador por integração na vertical.

Grutka (2013) em sua pesquisa correlacionou a descarga sólida do amostrador ISCO com o amostrador USDH-48 e obteve uma correlação linear de Pearson de 0,96, sendo considerada muito forte. Portanto, demonstrou que o equipamento ISCO tem uma boa representatividade da concentração de sedimentos em suspensão.

2.3.2 Sensor óptico de turbidez

O sensor óptico de turbidez, chamado de turbidímetro, faz medições diretas e pontuais de sedimentos em suspensão. Este equipamento mede a turbidez da água pelo efeito fotoelétrico devido à emissão de um feixe luminoso e na detecção da luz refletida pelas partículas em suspensão ou diferença de intensidade entre a luz emitida e recebida, a qual é convertida em sinal elétrico e mostrada no equipamento (CARDOSO, 2011).

Segundo Navratil et al. (2011) a utilização do turbidímetro é um método fácil e muito utilizado para o monitoramento contínuo de sedimentos em suspensão. Porém, há muitas incertezas desse método, como apontam Navratil et al. (2011), sendo elas: escolha do turbidímetro adequado, frequência de aquisição dos dados, flutuação do sinal do turbidímetro, técnicas de amostragem de campo, representatividade do ponto de medição, problemas técnicos de campo, procedimentos de laboratório. Os pesquisadores realizaram testes de Monte Carlo para obter a propagação dos erros dessas incertezas na concentração de sedimentos em suspensão (CSS). Os resultados apresentaram erros médios para amostras individuais de 10%, podendo alcançar 70% para concentrações maiores.

Um estudo realizado na bacia do rio Sagrado no Paraná por Manz, Santos e Paula (2011) avaliaram a metodologia convencional comparando com o monitoramento automático de turbidez, tendo como resultado uma boa relação da concentração de sedimentos em suspensão com a turbidez, assim confirmou-se a aplicabilidade do método automático. Para Merten et al. (2011) essa relação de concentração de sedimentos em suspensão e turbidez para ser eficiente é importante realizar a calibração deste sensor através de amostragem convencionais no mesmo local da sonda do turbidímetro.

Outros estudos como o de Lopes et al. (2009), Pereira (2011), Alésio, Paiva e Paiva (2012) e Grutka (2013) encontraram coeficiente de determinação iguais ou maiores que 0,7, afirmando uma boa correlação entre CSS e a Turbidez. Porém, os sensores de turbidez devem estar posicionados em locais representativos de toda a seção de medição e seus intervalos de coleta; também estar calibrado e o sensor óptico sempre em bom estado, ou seja, além de obter a limpeza automática da lente para não haver erros na leitura, ter o local da sonda limpo, principalmente em locais

com áreas mais urbanizadas. Assim os equipamentos se demonstram bons e de boa praticidade nas coletas de informações para o monitoramento contínuo da concentração de sedimentos em suspensão.

2.4 Relação da turbidez com a concentração de sedimentos em suspensão

O monitoramento dos sedimentos com o turbidímetro requer uma relação estatística significativa entre a concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e a aquisição do sinal de turbidez, para isso são realizados amostragens da mistura água e sedimento no mesmo local onde a sonda está posicionada (MERTEN et al., 2011; MERTEN; MINELLA, 2011; SUN; CORNISH; DANIELL, 2001). Esses dados são organizados em uma tabela e depois são gerados gráficos para obter essa relação.

Entretanto, a condição que o sensor tende a estimar a CSS em rios é decorrente da estreita relação apresentada entre a concentração de sedimentos em suspensão e a intensidade de espalhamento de luz. Por outro lado, à medida que aumenta o tamanho dos sedimentos, a intensidade do espalhamento é reduzida. Nesse caso, apenas as partículas com tamanho menor ou equivalente ao silte são sensíveis aos sensores de turbidez. Quanto menor for o tamanho das partículas mais intenso é o sinal da turbidez. Já para as partículas de tamanhos maiores, como as areias, o sensor tem dificuldade para captar as concentrações, pois o seu sinal é reduzido (MERTEN; MINELLA, 2011). Na figura 1 podemos observar os efeitos do tamanho da partícula e da concentração de sedimentos em suspensão sobre o sinal do turbidímetro.

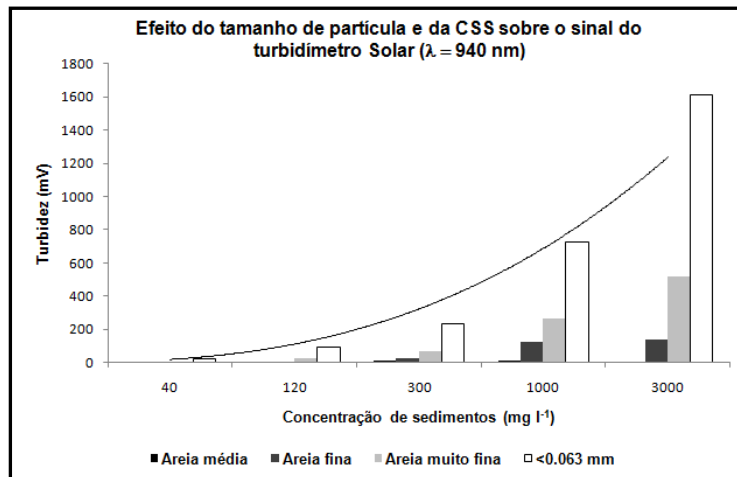


Figura 1 – Gráfico referente à representação dos efeitos da concentração de sedimentos em suspensão e do tamanho de partículas sobre o sinal de turbidez

Fonte: IPH, 2010, apud Merten; Minella (2011).

Manz, Santos e Paula (2011), em estudos realizados na bacia do rio Sagrado no Paraná, com área de drenagem de 85 km², apresentaram valores de R² de 0,97 para a relação de turbidez com a CSS, representado por uma equação linear.

Na dissertação de mestrado de Pereira (2010) foi realizada uma aferição do turbidímetro com o amostrador ISCO para a calibração do mesmo. Este estudo foi realizado na bacia Rincão do Soturno e Rancho do Amaral no município de Santa Maria (RS), obteve uma correlação da turbidez com a CSS de R² igual a 0,71 e 0,76, respectivamente representado por uma equação linear.

Grutka (2013), em seu trabalho realizado na bacia Menino Deus IV no município de Santa Maria (RS) obteve uma correlação de turbidez e CSS utilizando o amostrador ISCO na subida das ondas de cheia de R² igual a 0,925 representado por uma equação linear.

2.5 Balanço sedimentométrico no reservatório

A construção de reservatórios ocasiona mudanças significativas no curso d'água tanto a montante da obra quanto a jusante. Essas alterações afetam diretamente os processos sedimentológicos, pois no reservatório ocorre o acúmulo

de sedimentos reduzindo a concentração de sedimento no barramento. Em consequência, a transformação da energia potencial (acumulada no reservatório e perda de coluna de água) em energia cinética, aumenta o poder erosivo do escoamento a jusante, provocando o aprofundamento da calha do rio e a erosão das margens (CARVALHO, 2008).

Uma das alternativas para estimar a produção de sedimentos em um reservatório é a utilização do método do balanço sedimentométrico que consiste em três componentes, a entrada, o armazenamento e a saída de sedimentos. Em termos de entrada os sedimentos são fornecidos pelas erosões ocorridas nas margens dos afluentes a montante do reservatório (HASSAN et al., 2011). Já o armazenamento consiste nos sedimentos que são depositados ao longo do reservatório, e a saída consiste nos sedimentos que passam pelo reservatório e vão para a jusante do mesmo.

Hassan et al. (2011) obtiveram relações entre a entrada e a saída de sedimentos no rio principal de Changjiang em um período de 22 anos antes de ocorrer mudanças como construções de barramentos. A pesquisa revelou que na análise do equilíbrio de sedimentos em suspensão ao longo do rio principal de Changjiang é bastante complexo em relação ao padrão espacial e temporal de troca de sedimentos. O padrão espacial de troca de sedimentos reflete alterações a jusante da bacia, como a topografia, geologia, morfologia do rio e as entradas de grandes afluentes. E os padrões temporais são atribuídos principalmente à hidrologia do rio.

Os balanços sedimentométrico são muito utilizados principalmente nos estudos de viabilidade de usinas hidrelétrica, pois na maioria dos casos, este estudo permite uma análise adequada dos impactos decorrentes da queda de equilíbrio sedimentológico do estirão afetado pelo empreendimento.

Um exemplo de estudo de balanço sedimentométrico foi realizado no rio Madeira, onde utilizaram o modelo HEC-6 para as simulações aplicadas a reservatórios. O modelo calculou os depósitos ao longo do perfil longitudinal, prevendo os volumes e locais de assoreamento. Quando aplicado em trechos de rios, pôde-se prever a condição de balanço entre afluências e saídas de descargas sólidas, diagnosticando a ocorrência de erosão ou assoreamento (MOREIRA, 2007).

Outro modelo que faz a análise do balanço sedimentométrico é o HEC-HMS versão 4.0, onde foi adicionada uma interface para a simulação da erosão superficial

e o transporte de sedimentos do canal juntamente com a capacidade de assimilação preliminar para a qualidade da água e transporte de nutrientes (USACE-HEC, 2013).

2.6 Sistema de Modelagem Hidrológica HEC-HMS Versão 4.0

O HEC-HMS é um software desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE – U.S. Army Corps of Engineers). Foi idealizado para simular os processos hidrológicos completos do comportamento de bacias hidrográficas dendríticas. O modelo gera hidrogramas e informações quanto ao volume de deflúvio, vazão de pico e tempo de escoamento, que podem ser usados para diversos fins como drenagem urbana, disponibilidade hídrica, impacto de urbanização, dimensionamento de vertedores em barragens, etc. (USACE-HEC, 2013). Ferramentas complementares foram adicionadas na quarta versão do programa, para fazer estimativas de parâmetros como a análise da área e profundidade, previsão de fluxo, a erosão e o transporte de sedimentos e qualidade da água de nutrientes (USACE-HEC, 2013).

O software é constituído por três componentes básicos: o Modelo de Bacia, o Modelo Meteorológico e as Especificações de Controle (USACE-HEC, 2013) (Figura 2). O processamento do modelo hidrológico no HEC-HMS requer inicialmente a entrada de dados da bacia hidrográfica, bem como dados meteorológicos. Posteriormente, são escolhidos os métodos para o cálculo das perdas, de transformação chuva-vazão, de composição do escoamento de base, de propagação em rios; considerando parâmetros relacionados a tais métodos, como a área das sub-bacias, tempo de concentração, fatores de perda por infiltração, evapotranspiração e perdas em sumidouros (MACEDO, 2010).

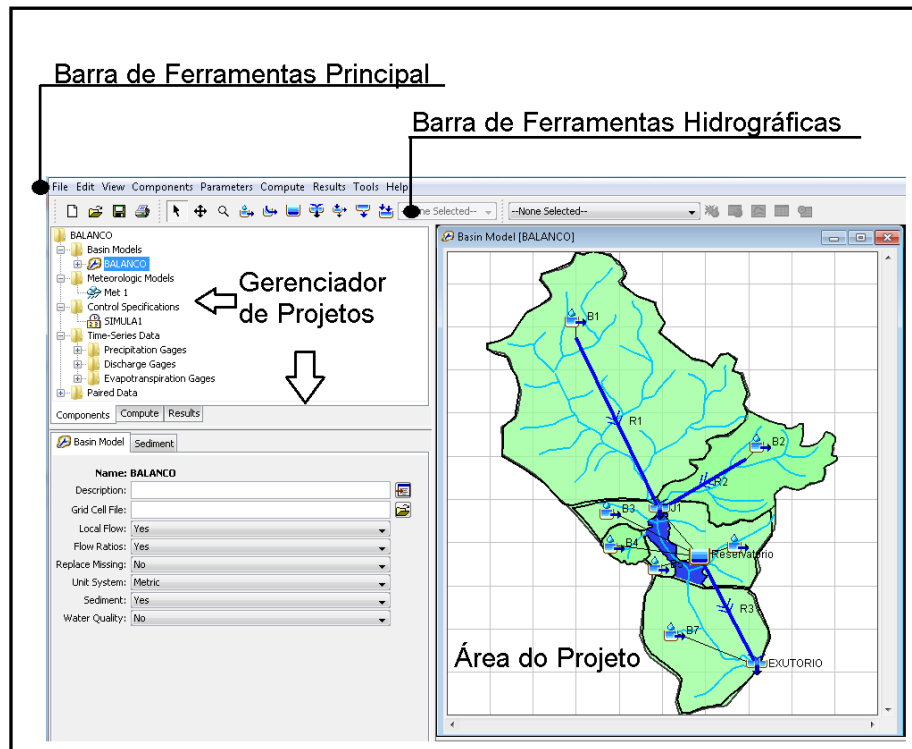


Figura 2 – Área de trabalho do sistema de modelagem HEC-HMS versão 4.0

Fonte: Do autor.

2.6.1 Modelo bacia hidrográfica

Nesta categoria são inseridos e manipulados os dados referentes à geometria da bacia hidrográfica, sendo representado o esquema hidrológico da área, com as sub-bacias, os trechos de rios, possíveis reservatórios, junções e divisões dos canais (USACE-HEC, 2013). Neste módulo de bacia pode ser ativado o componente de sedimentos, onde são selecionados os métodos de cálculo da erosão e do transporte de sedimentos para toda a bacia hidrográfica (Figura 3a e 3b).

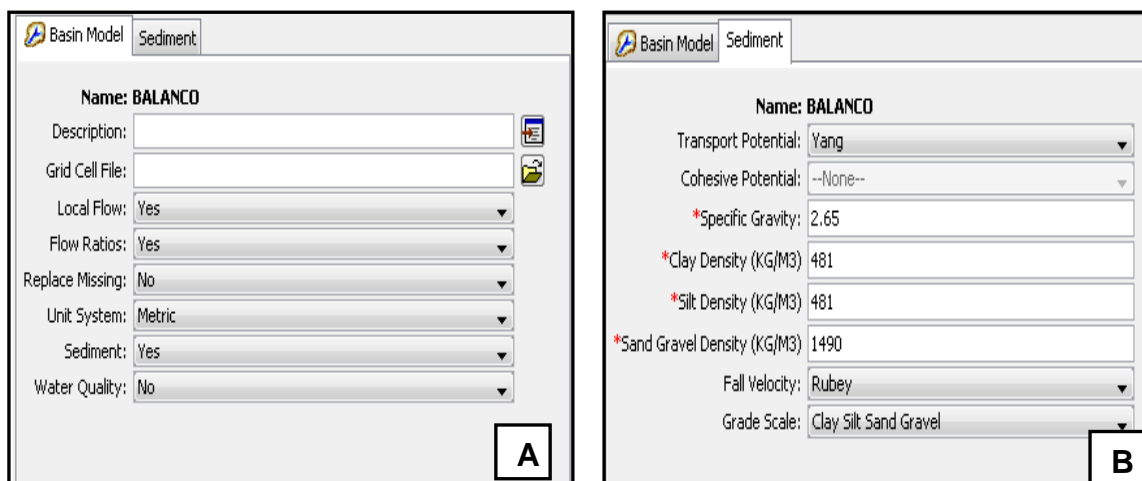


Figura 3 – Componente de Sedimentos ativado no modelo de bacia (3a) e Componente de Sedimentos aberto com os métodos principais e parâmetros de sedimentos (3b)

Fonte: Modificado de USACE-HEC (2013).

Existem 7 diferentes métodos de cálculo para o transporte potencial dos sedimentos com seus respectivos tipos que estão disponíveis no modelo HEC-HMS 4.0 como se pode observar na tabela 1.

Tabela 1 – Funções de transporte potencial para calcular a quantidade de sedimentos transportada em um escoamento com seus respectivos tipos e métodos.

Métodos	Tipo	Métodos	Referências
Ackers-White	NC	SP	Asckers and White, 1973
Engelund-Hansen	NC	SP	Engelund and Hansen, 1967
Laursen-Copeland	NC	ES	Laursen, 1958; Copeland and Thomas, 1989
Meyer-Peter Muller	NC	ES	Meyer-Peter and Müller, 1948
Toffaleti	NC	RE	Toffaleti, 1968
Wilcock	NC	ES	Wilcock and Crowe, 2003
Yang	NC	SP	Yang, 1984
Krone Parthenaides	CO	_	Krone, 1962; Parthenaides, 1962

Fonte: Traduzido de USACE-HEC (2013).

NC: Não-coeso;

CO: Coeso;

ES: Excesso de cisalhamento;

SP: Potencia de escoamento;

RE: Regressão.

Os parâmetros padrões para o início da simulação de sedimentos são: peso específico dos sedimentos, densidade específica da argila (Kg/m^3), densidade

específica do silte (Kg/m^3), densidade específica da areia e cascalho (Kg/m^3). Neste módulo também são selecionados os métodos para calcular a velocidade de queda dos sedimentos; os métodos disponíveis são: Toffaleti (1968), Relatório 12 (Comitê Interinstitucional, 1957), Rubey (1933) e Van Rijn (1993).

No elemento hidrológico sub-bacia é calculada as perdas da precipitação por interceptação, evaporação e infiltração, sendo representada pelos tipos de cálculos: *Canopy Method* representa a cobertura vegetal existente na bacia; *Surface Method* representa a cobertura da superfície, ou seja, o tipo de solo existente na bacia; *Loss Method* calcula a perda por infiltração real. E também são calculadas a transformação da precipitação em escoamento e a separação deste escoamento em superficial e de base pelos tipos de cálculos: *Transform Method* calcula a transformação da precipitação em escoamento superficial e o *Baseflow Method* que calcula o escoamento de base na bacia que está sendo representada. E o método que calcula a erosão na bacia (*Erosion Method*) (Figura 4).

Canopy Method	Surface Method	Loss Method	Transform Method	Baseflow	Erosion Method
<ul style="list-style-type: none"> • Simple Canopy • Dinamic Canopy • Gridded Simple Canopy 	<ul style="list-style-type: none"> • Simple Surface • Gridded Simple Surface 	<ul style="list-style-type: none"> • Deficit and Constant • Exponential • Green and Ampt • Gridded Deficit Constant • Gridded Green and Ampt • Gridded SCS Curve Number • Gridded Soil Moisture Accounting 	<ul style="list-style-type: none"> • Clark Unit Hydrograph • Kinematic Wave • Modclark • SCS Unit Hydrograph • Snyder Unit Hydrograph • User-specified S-Graph • User-specified Unit Hydrograph 	<ul style="list-style-type: none"> • Bounded Recession • Constant Montly • Linear Reservoir • Nonlinear Boussinesq • Recession 	<ul style="list-style-type: none"> • Modified USLE • Build-up Wash-off

Figura 4 – Fluxograma dos métodos de cálculo utilizado no elemento sub-bacia do programa HEC-HMS 4.0

Fonte: Modificada de USACE-HEC (2013).

No elemento hidrológico rio (*reach*) é calculado a propagação da precipitação no canal com suas perdas e ganhos e o transporte de sedimentos. No cálculo da propagação (*Routing Method*) são disponíveis seis diferentes tipos de métodos, no cálculo de perdas e ganhos (*Loss/Gain Method*) são disponíveis apenas dois e no

cálculo do transporte de sedimentos (*Sediment Method*) são disponíveis três métodos como se pode observar no fluxograma da figura 5.

Routing Method	Loss/Gain Method	Sediment Method
<ul style="list-style-type: none"> •Kinematic Wave •Lag •Modified Puls •Muskingum •Muskingum-cunge •Straddle Stagger 	<ul style="list-style-type: none"> •Constant •Percolation 	<ul style="list-style-type: none"> •Linear Reservoir •Uniform Equilibrium •Volume Ratio

Figura 5 – Fluxograma dos métodos de cálculo no elemento rio do Sistema de Modelagem HEC-HMS 4.0

Fonte: Modificada de USACE-HEC (2013).

No elemento hidrológico reservatório (*reservoir*) é calculado a propagação da precipitação no reservatório por três métodos: *outflow curve*, *outflow structures* e *specified release*, sendo que dentro de cada método estão os diferentes cálculos de armazenamento no reservatório (*Storage Method*) com seus respectivos parâmetros iniciais como mostra na figura 6. E a propagação e retenção dos sedimentos (*Sediment Method*) por quatro diferentes métodos.

O método *outflow curve* utiliza o algoritmo de Pulz Modificado para calcular a propagação em relação do armazenamento e a descarga fornecida pelo usuário. Esta relação pode ser escolhida no método de armazenamento sendo oferecidas três diferentes relações: cota-area-descarga, cota-volume-descarga e volume e descarga como se pode observar na figura 6.

O método *outflow structures* é utilizado para modelar reservatório com estruturas de saída, por exemplo, vertedor, boeiros e bombas de captação de água. Neste método também se pode considerar algumas rupturas do reservatório, a evaporação e infiltração do mesmo. Dentro deste método são selecionadas as relações de armazenamento de água, sendo disponíveis duas relações a cota-área e cota-volume como se pode observar na figura 6.

O método *specified release* é utilizado para modelar reservatórios de descarga completa, onde é conhecido cada intervalo de tempo de uma simulação,

sendo utilizados dados observados de vazão. O método é usado para preservar e armazenar a água que chega ao reservatório utilizando a entrada, saída e a conservação de massa. Este método também é selecionado as relações de armazenamento de água sendo duas diferentes opções a cota-área e cota-volume (Figura 6).

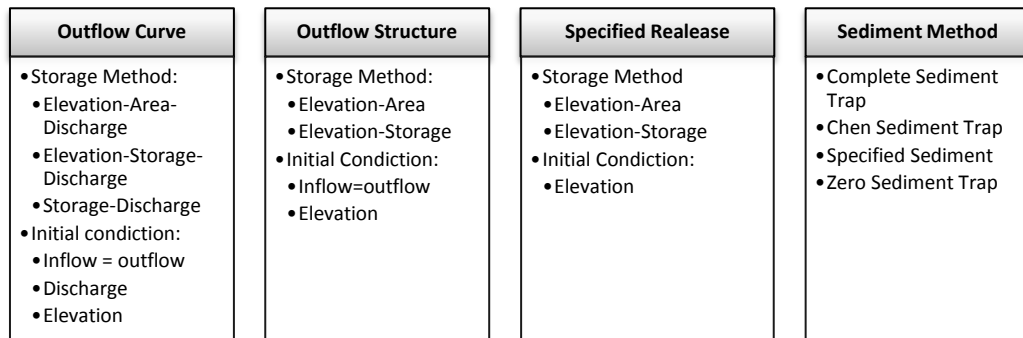


Figura 6 – Fluxograma dos métodos de cálculos do elemento reservatório no Sistema de Modelagem HEC-HMS 4.0

Fonte: Modificada de USACE-HEC (2013).

2.6.2 Modelo meteorológico

O modelo meteorológico constitui na entrada dos dados de precipitação e evapotranspiração, sendo selecionado o método de distribuição temporal destes (USACE-HEC, 2013) (Figura 7).

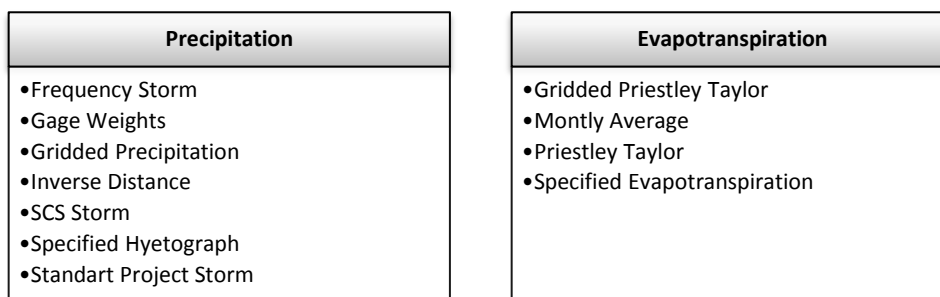
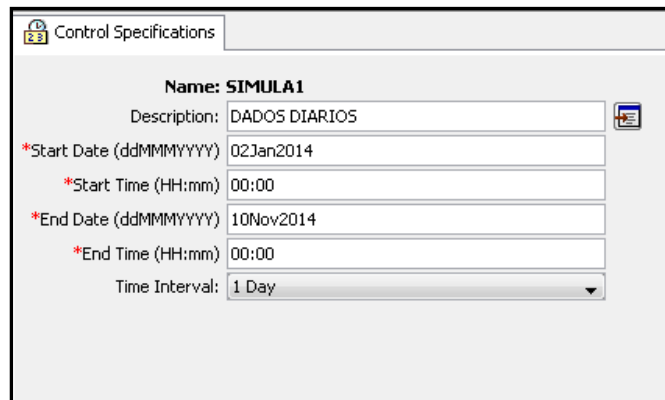


Figura 7 – Fluxograma dos métodos de cálculo do modelo meteorológico do Sistema de Modelagem HEC-HMS 4.0

Fonte: Modificada de USACE-HEC (2013).

2.6.3 Especificações de controle

Refere-se aos períodos de tempo para os quais serão realizados os cálculos, incluindo data e horário de início e fim do determinado período, bem como o intervalo ou “passo” de computação dos dados (USACE-HEC, 2013) (Figura 8).



Control Specifications	
Name:	SIMULA1
Description:	DADOS DIARIOS
*Start Date (ddMMYYYY):	02Jan2014
*Start Time (HH:mm):	00:00
*End Date (ddMMYYYY):	10Nov2014
*End Time (HH:mm):	00:00
Time Interval:	1 Day

Figura 8 – Modulo das especificações de controle para a inicialização da simulação do Sistema de Modelagem HEC-HMS 4.0

2.6.4 Aplicações do Sistema de Modelagem HEC-HMS 4.0

Os principais usos de modelos hidrológicos conforme TUCCI (2005):

- Melhor entendimento do comportamento dos fenômenos hidrológicos nas bacias: permite ao hidrólogo separar os fenômenos e, em consequência estudar a sensibilidade das variáveis de diferentes características das bacias.
- Análise de consistência e preenchimento de falhas: permite a extensão da série de vazão com base na precipitação.
- Previsão de vazão: permite estimar a vazão através da precipitação conhecida, com a vazão do posto a montante ou na combinação dos mesmos.
- Dimensionamento e previsão de cenários de planejamento: conhecida a precipitação e o risco de ocorrência da mesma é possível estimar a vazão resultante, para cenários de uso e modificações da bacia, visando ao

dimensionamento ou planejamento de alternativas de desenvolvimento do sistema.

- Efeitos resultantes da modificação do uso do solo.

O modelo hidrológico de chuva-vazão HEC-HMS apresenta várias versões, mas as mais utilizadas são as versões 3.4 e 3.1. Nessas versões os autores utilizaram o modelo com diferentes objetivos como, simulação de escoamento em uma bacia (HAWATURA; NAJIM, 2013), avaliação dos impactos hidrológicos das mudanças climáticas em uma bacia (MEENU; HEHANA; MUJUMDAR, 2013), modelagem hidrológica de eventos e contínua em uma bacia (SILVA; WEERAKOON; HERATH, 2014), estimativa de picos de cheias em uma bacia (GUO; ASCE; MARKUS, 2011; HEGEDÜS, 2013).

A sua mais nova versão de 2013 (versão 4.0) ainda há poucas publicações. Uma delas foi a pesquisa de Pak et al. (2015) que utilizaram o modelo HEC-HMS 4.0 para simular as respostas hidrológicas e de sedimentos a longo do tempo na Bacia Hidrográfica do Alto Norte do Rio Bosque no Texas (USA), obtendo uma boa resposta da simulação de sedimentos na bacia de estudo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida no período de fevereiro de 2014 a julho de 2015 e consistiu:

- Monitoramento hidrossedimentológico na estação fluviométrica João Goulart a jusante ao reservatório do Vacacaí Mirim. Composto por medições a campo da descarga líquida e de amostragem direta e indireta de sedimentos em suspensão e amostragem do material de leito da seção do rio.
- Análise de laboratório para a determinação da concentração de sedimentos em suspensão e a granulometria dos sedimentos suspensos e de leito.
- Caracterização física e geomorfológica da bacia a jusante ao reservatório e a sua cobertura vegetal.
- Coleta e análise dos dados pluviométricos sobre a bacia em estudo.
- Balanço sedimentométrico no reservatório do Vacacaí Mirim com o auxílio do programa de modelagem HEC-HMS versão 4.0.

3.1 Monitoramento

3.1.1 Área de estudo

A área em estudo localiza-se na cabeceira do rio Vacacaí Mirim, na estação fluviossedimentométrica João Goulart, com área igual a 34,76 Km². Encontra-se na região central do Rio Grande do Sul no município de Santa Maria inserida na bacia do rio Vacacaí Mirim (Figura 9). A estação fluviossedimentométrica está localizada nas coordenadas 29° 41' 26,79" S e 53° 46' 05,26" O.

A estação fluviossedimentométrica de monitoramento é composta de uma ponte hidrométrica para as medições de descarga líquida e sólida na seção, linígrafo, régua linimétrica, sensor de turbidez e amostrador automático ISCO modelo 3700.

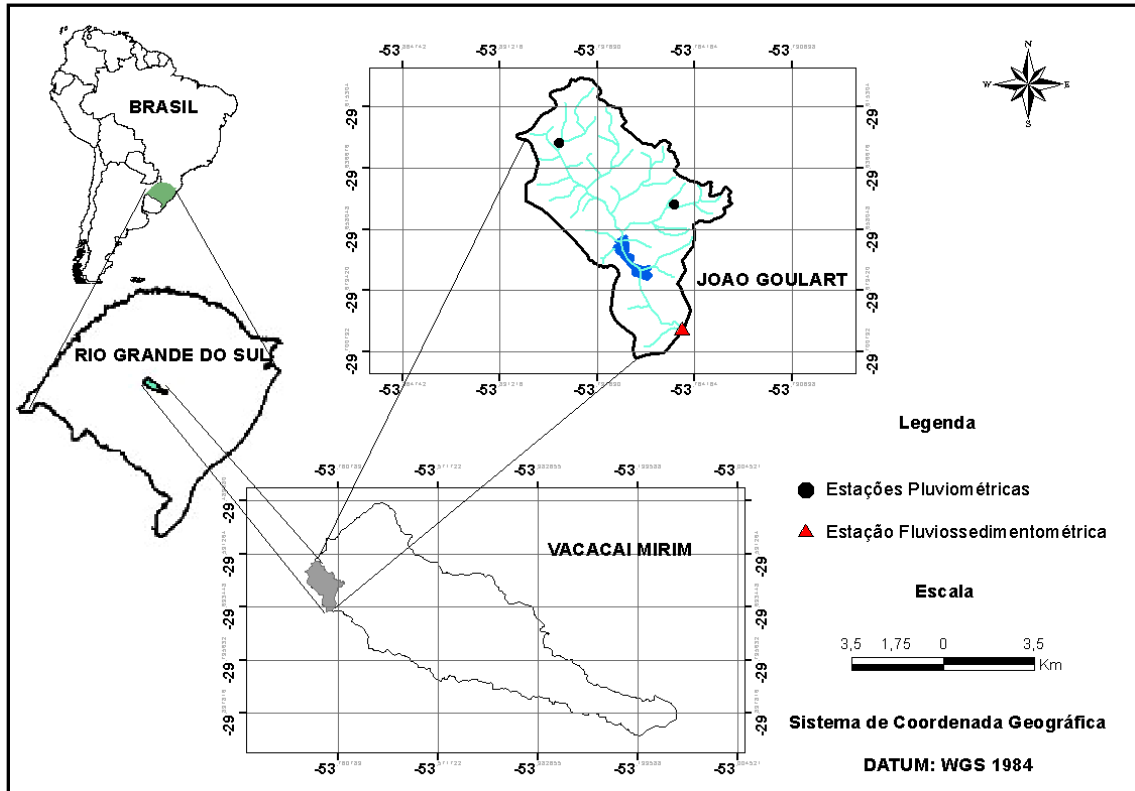


Figura 9 – Mapa de localização da sub-bacia hidrográfica João Goulart

Fonte: Do autor.

Nas figuras 10a e 10b é apresentada a seção transversal do rio da Estação Fluviossedimentométrica João Goulart nos períodos de seca e de cheia, respectivamente.

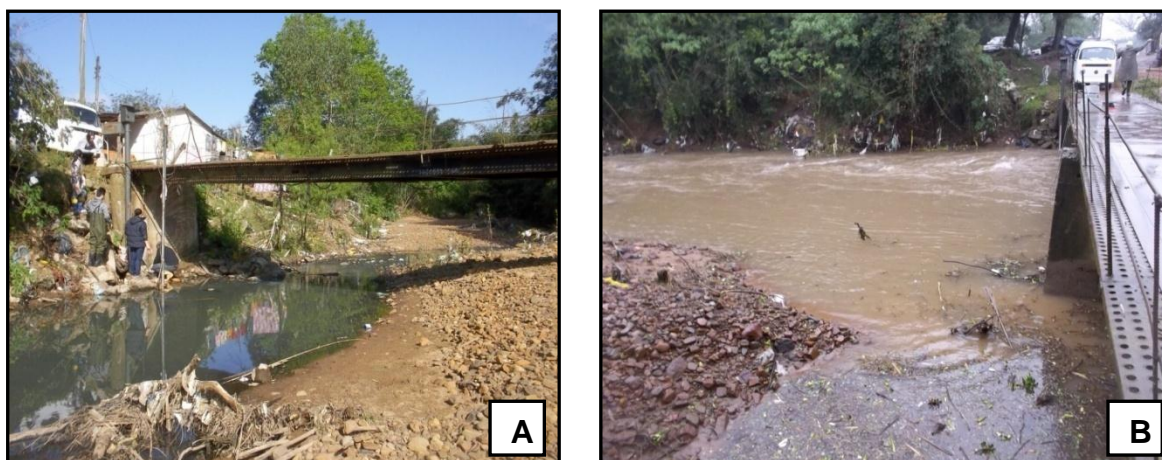


Figura 10 – Vista da Estação Fluviossedimentométrica João Goulart em período sem precipitação (A) e em período chuvoso (B)

Fonte: Do autor.

3.1.2 Caracterização da área de estudo

3.1.2.1 Uso e ocupação do solo

A bacia de estudo caracteriza-se como rural abrangendo maior área de vegetação com 64,67% seguida de campo com 19,39% (Tabela 2). A vegetação é composta de mata nativa, pinus e eucalipto conforme Grutka (2013). A área a montante e a jusante ao reservatório tem alto nível de degradação ambiental, devido à retirada da cobertura vegetal e de áreas ocupadas pela agricultura próxima ao curso d'água como se pode observar no mapa de uso e ocupação do solo da figura 11.

Tabela 2 – Uso do solo da área em estudo da estação fluviossedimentométrica João Goulart

Uso do solo	João Goulart	
	Área (Km ²)	(%)
Vegetação	22,48	64,67
Campo	6,74	19,39
Impermeável	3,24	9,33
Agricultura	1,52	4,37
Solo Exposto	0,06	0,17
Recursos Hídricos	0,72	2,07

Fonte: Do autor.

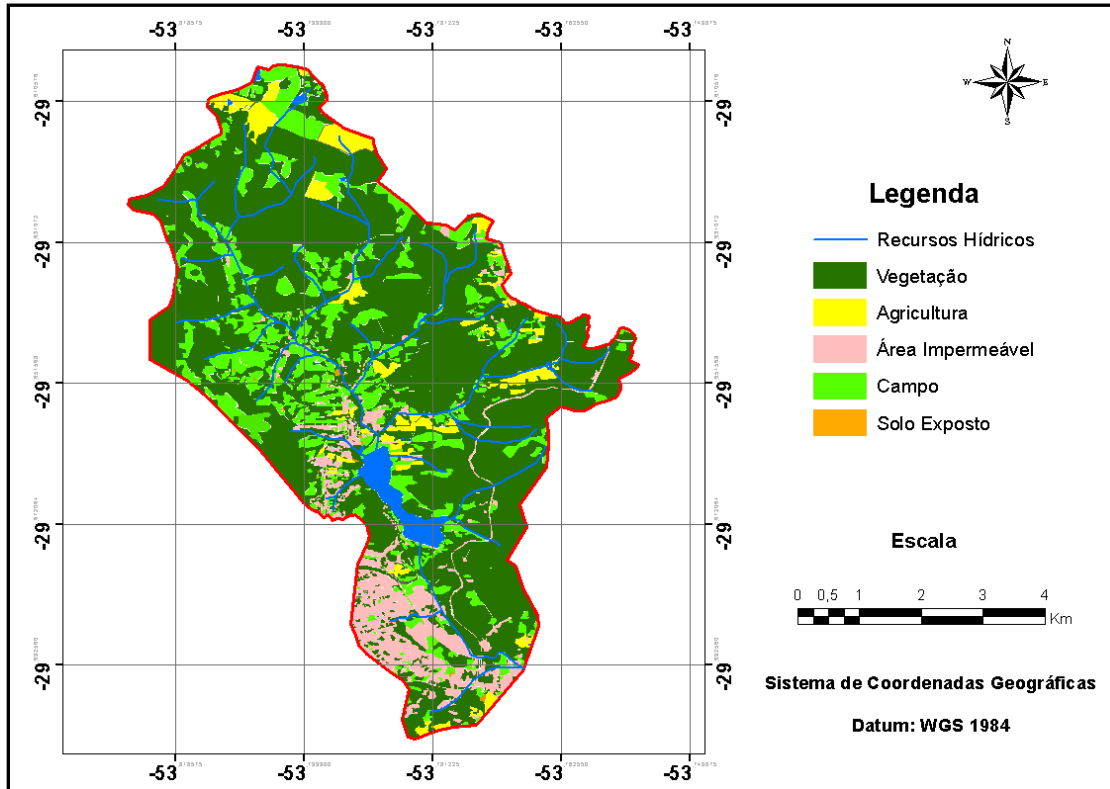


Figura 11 – Mapa do uso e ocupação do solo da área em estudo da estação fluviossedimentométrica João Goulart

Fonte: Do autor.

3.1.2.2 Classificação do solo

Para a classificação do solo da área em estudo foi utilizado como base o mapa de classificação do solo da bacia do Vacacaí Mirim confeccionado por Casagrande (2004). Assim, obtiveram-se os tipos de solos pertencentes à bacia João Goulart como está apresentado na tabela 3 e figura 12.

Os tipos de solos predominantes na bacia é o Re4 (Solo Litólico Eutrófico Montanhoso) abrangendo 13,03 Km² da área isso representa 37,49%, seguido de Re_C_Co (Associação Neossolo Litólico Eutrófico Chernossólico-Cambissolo-Colúvios), Tba_Rd (Associação Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico Alissólico e Neossolo Litólico Eutrófico) e Pba1 (Podzólico Bruno- Acinzentado Álico) abrangendo 23,86%, 16,75% e 11,34% da área total da bacia, respectivamente.

Tabela 3 – Classificação do solo na área em estudo da estação fluviossedimentométrica João Goulart

Tipo de solo*	João Goulart	
	Área (Km ²)	(%)
RE4	13,03	37,49
Re_c_co	8,29	23,86
RD1	1,57	4,51
Re3	1,44	4,14
Tba_Rd	5,82	16,75
Pea_Co	0,66	1,90
Pba1	3,94	11,34

Fonte: Do autor.

*Re4: Solo Litólico Eutrófico Montanhoso;
 Rd1: Neossolo Litólico Distrófico ondulado;
 Re-C-Co: Associação Neossolo Litólico Eutrófico Chernossólico-Cambissolo-Colúvios;
 TBa-Rd: Associação Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico Alissólico e Neossolo Litólico Eutrófico;
 PBa1: Podzólico Bruno- Acinzentado Álico;
 Re3: Solo Litólico Eutrófico Relêvo Forte Ondulado.

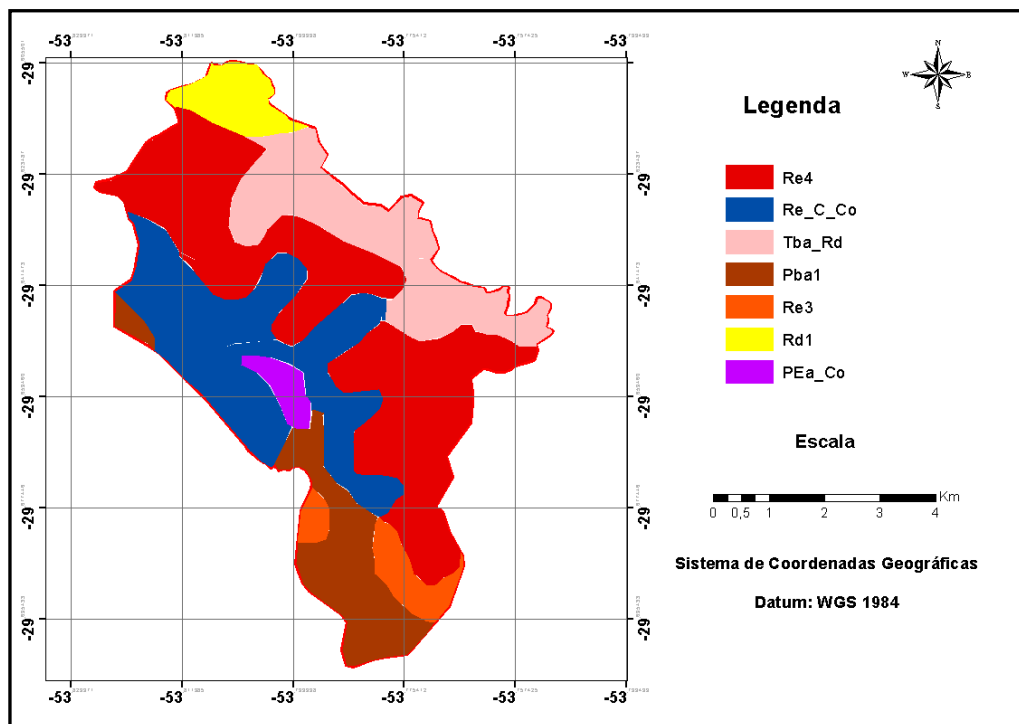


Figura 12 – Mapa de classificação do solo na bacia hidrográfica João Goulart

Fonte: Do autor.

3.1.3 Medidas pluviométricas

Os dados de chuva foram obtidos pelas estações pluviométricas, Rancho do Amaral e Sítio do Maciel. A estação pluviométrica Sítio do Maciel localiza-se nas coordenadas 29°39'2,50" S e 53°46'26,21" O. Esta estação é operada com o pluviógrafo de balança com datalogger. A estação pluviométrica Rancho do Amaral localiza-se nas coordenadas 29°37'46,5" S e 53°48'39,6" O. Esta estação é operada com um pluviógrafo eletrônico do tipo cubas basculante.

3.1.4 Monitoramento de nível do rio

O monitoramento do nível do rio foi realizado através do registrador de nível digital com datalogger que foi instalado na Estação Fluviossedimentométrica João Goulart em janeiro de 2014 (Figura 13). A variação do nível do rio foi registrada neste equipamento em intervalos de um minuto e também com o auxílio da régua linimétrica que foi instalada na seção de estudo para a verificação da cota do rio "in situ" na hora das amostragens.



Figura 13 – Linígrafo digital, de bóia, com datalogger

Fonte: Do autor.

3.1.5 Medições de descarga líquida

As medições de descarga líquida foram realizadas por dois métodos: o método convencional e o método acústico.

3.1.5.1 Método convencional

A vazão foi obtida através do método de integração na vertical, que subdivide a seção em faixas verticais (SANTOS et al., 2001). Para as medições da velocidade em cada vertical foram utilizados: o molinete fluviométrico de hélice n. 1–128.000 (Figura 14A e 14B), para as cotas mais altas da seção do rio e o micromolinete de hélice n. 3 (Figura 15), para as cotas mais baixas na seção do rio. Os dois equipamentos foram manuseados a vau, pelo método simplificado (a 60% da profundidade), sendo utilizadas as equações específicas de cada molinete.



Figura 14 – Medição com o molinete fluviométrico marca HC, n. 128.000 (A), vista aproximada do molinete fluviométrico no campo (B)

Fonte: Do autor.



Figura 15 – Medição com o micromolinetete marca A-OTT, Hélice 3

Fonte: Do autor.

3.1.5.2 Método acústico

Neste trabalho foi utilizado o equipamento de medição de vazão por efeito doppler, o perfilador acústico de corrente (ADP), sua limitação de medição é de 5 m para medidas de velocidade e vazão e 15 m para as medidas de profundidade para a batimetria. Este equipamento possui quatro transdutores para a determinação do perfil, com a frequência de 3,0 MHz que emite feixes sonoros perpendiculares e um transdutor de 1,0 MHz utilizado para medições de profundidade no modo feixe vertical. Junto a este equipamento existe um software fornecido pelo fabricante para o processamento dos dados de velocidade, vazão e perfil transversal da seção.

A medição com o ADP foi realizada da seguinte forma: primeiro foi instalado o ADP (sensor) na prancha hidrodinâmica e fixado duas cordas para guiá-lo da margem direita do rio até a margem esquerda, sendo guiado por duas pessoas uma em cada lado da seção do rio (Figura 16A e 16B). Foram realizadas três travessias, sendo que cada uma corresponde a duas passagens do ADP, iniciando pela margem direita até a esquerda do rio e retornando para o ponto de partida.



Figura 16 – Medição de vazão na seção do rio com o método acústico ADP. Ponto de partida da travessia do ADP na margem direita (A) e travessia do ADP até a margem esquerda da seção (B).

Fonte: Do autor.

3.1.6 Medições de sedimentos

3.1.6.1 Monitoramento da turbidez

Foi instalado na estação fluviossedimentométrica João Goulart um turbidímetro digital DTS-12 que contém uma sonda para medição de turbidez e um registrador de leituras Datalogger modelo Axiom H2 (Figura 17A e 17B). Esta sonda foi fixada a 1,2 m da margem direita e a 0,10 m do leito do rio e com a posição inclinada, contendo um sistema de limpeza automático na face do sensor óptico para retirar a matéria orgânica que fica retida no sensor. Este sistema é composto por uma lâmina feita com material sintético que faz um movimento de arraste antes de cada leitura do sensor (DTS-12 SDI TURBIDITY SENSOR, 2008).

O turbidímetro foi programado para fazer leituras em intervalos de tempo de 1 minuto. A faixa de leituras é de 0 a 1600 NTU.

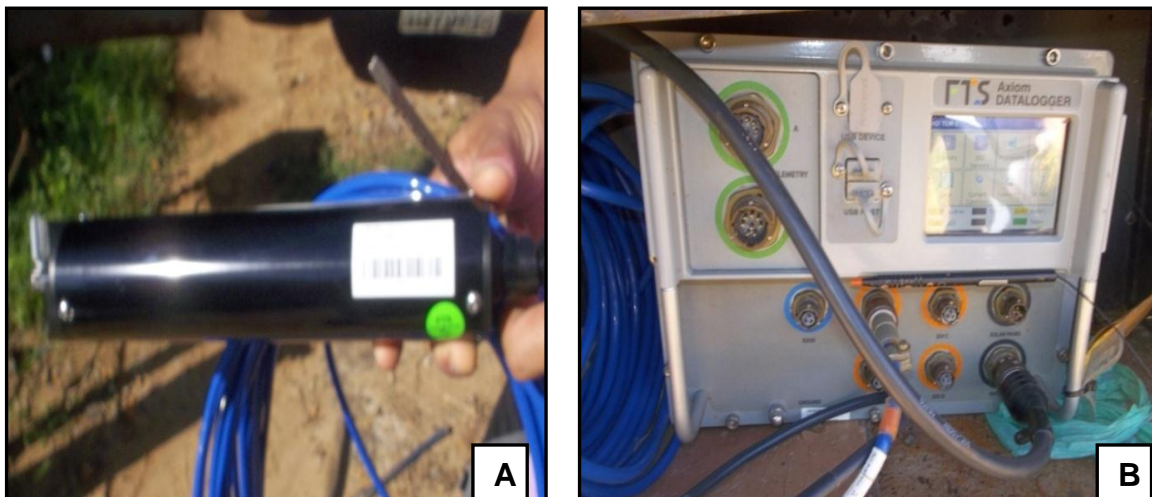


Figura 17 – Sonda de turbidez DTS-12 (A) e Datalogger modelo Axiom H2 (B)

Fonte: Do autor.

3.1.6.2 Amostrador ISCO 3700

O amostrador ISCO 3700 foi utilizado para realizar amostragens de sedimentos em suspensão para obter a concentração de sedimentos em suspensão e a descarga sólida do material em suspensão. Este amostrador é do tipo de bombeamento programável portátil que faz medições diretas e pontuais (Figura 18A e 18B).

O amostrador ISCO 3700 é composto de 24 garrafas com capacidade de 1000 mL, contendo uma bomba de sucção conectada a uma mangueira que vai até a seção do rio, que ao succionar coleta a mistura de água/sedimentos para dentro das garrafas em um intervalo pré-determinado (TELEDYNE ISCO, 2013).

Foi instalada a mangueira do amostrador automático junto ao suporte da sonda de turbidez, fixada a 1,2 m da margem direita e a 0,10 m do leito do rio.

As amostragens ocorreram nos períodos de chuvas sendo programados os intervalos de 3 minutos e 5 minutos para os eventos pequenos e grandes, respectivamente. Após a coleta as amostras foram levadas até o laboratório para a determinação da concentração de sedimentos em suspensão.

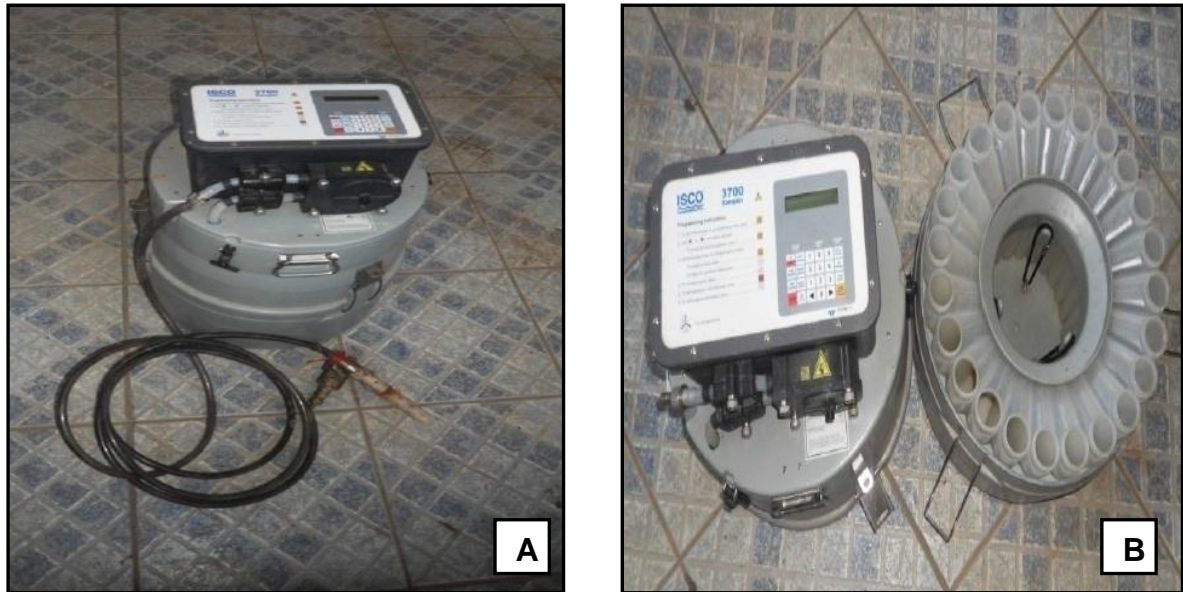


Figura 18 – Amostrador ISCO 3700 (A) e ISCO 3700 aberto com as 24 garrafas (B)

Fonte: Grutka (2013).

Para a determinação da descarga sólida em suspensão foi utilizada a equação 1.

$$Q_{SS} = 0,0864 \cdot Q \cdot C \quad (1)$$

Em que, **Q_{SS}**, é a descarga sólida em suspensão (ton/dia), **Q**, é a descarga líquida (m³/s), **C**, é a concentração de sedimentos em suspensão (mg/L).

3.1.6.3 Amostragens de material de arraste de fundo

A amostragem de material de arraste de fundo foi realizada com o auxílio do amostrador *Helley-Smith* (US-BL-84) (Figura 19), posicionadas em três verticais (1/6, 1/2 e 5/6 da largura da seção transversal do rio). Em cada vertical foi mergulhado o amostrador até o fundo do rio permanecendo por 30 minutos. Logo após, foi retirada às amostras da saca com o auxílio de água destilada para facilitar a remoção do material e colocada em um recipiente próprio, onde foi transportado até o laboratório do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA).



Figura 19 – Amostrador Helley-Smith

Fonte: Do autor.

3.1.7 Análises de laboratório

As análises de laboratório foram realizadas no laboratório do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro de Tecnologias da Universidade Federal de Santa Maria. Os métodos utilizados conforme Carvalho (2008) foram: filtração e evaporação para a determinação da concentração de sedimentos em suspensão; tubo de retirada pela base para a determinação da granulometria dos sedimentos em suspensão e peneiramento para a determinação da granulometria do sedimento de arraste.

3.2 Balanço sedimentométrico no reservatório

Neste capítulo são descritas as várias etapas para a execução do balanço sedimentométrico no reservatório Vacacaí Mirim, que consistiram de:

- Divisão das sub-bacias hidrográficas contribuintes ao reservatório do Vacacaí Mirim e caracterização das mesmas com o auxílio do software Arcgis 10.1 e de trabalhos anteriores já realizados nas sub-bacias.
- Discretização dos dados de entrada que foram utilizados no programa de modelagem HEC-HMS 4.0.
- Calibração das variáveis hidrológicas no programa HEC-HMS 4.0
- Execução do balanço sedimentométrico com o programa HEC-HMS 4.0.

3.2.1 Sub-bacias hidrográficas correspondentes ao balanço sedimentométrico no reservatório do Vacacaí Mirim

A área de contribuição ao reservatório do Vacacaí Mirim é formada por 3 sub-bacias (Menino Deus IV, Menino Deus II e Sítio do Tio Pedro) e 3 áreas diretas de contribuição. Estas sub-bacias contêm nos seus exutórios as estações fluviométricas que foram instaladas e monitoradas pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (GHIDROS) da Universidade Federal de Santa Maria. Posterior ao reservatório do Vacacaí Mirim localiza-se a estação fluviossedimentométrica João Goulart, recentemente instalada, onde é identificada a área de incremento do reservatório. A figura 20 apresenta o mapa das sub-bacias de contribuição ao reservatório e da área incremental a jusante do mesmo.

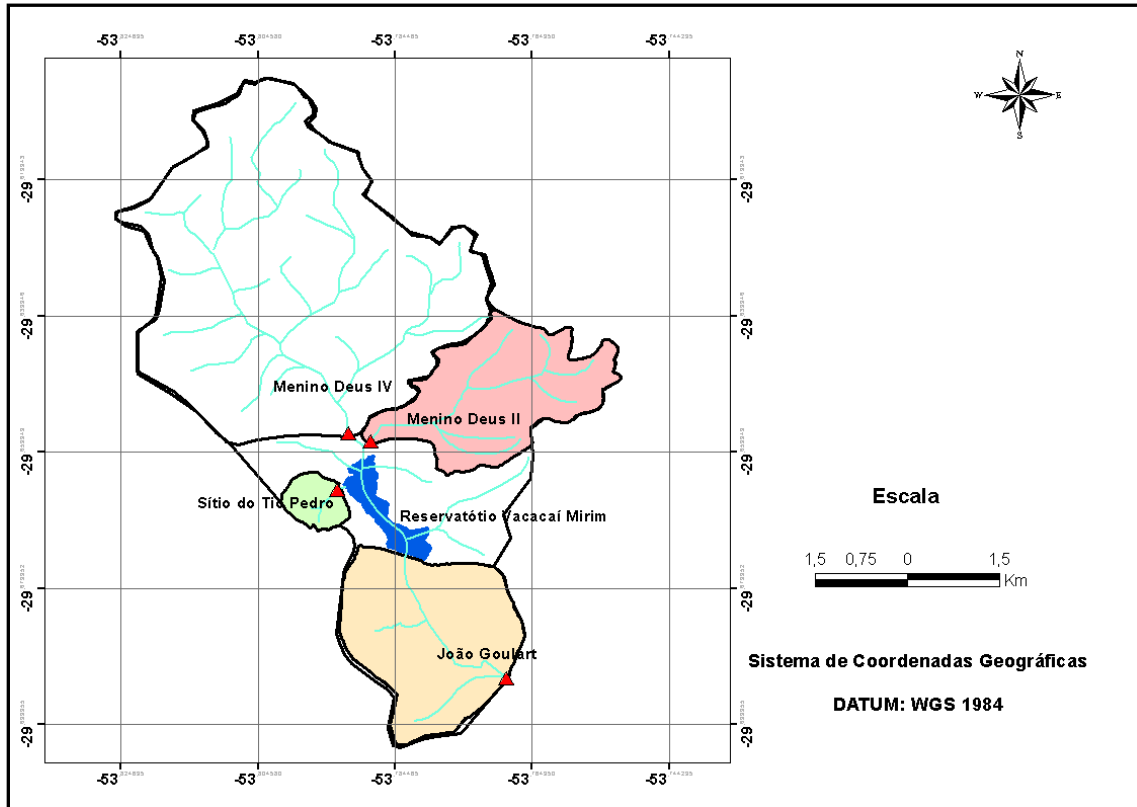


Figura 20 – Sub-bacias hidrográficas correspondente ao balanço sedimentométrico no reservatório do Vacacaí Mirim

Fonte: Do autor.

As sub-bacias foram denominadas da seguinte forma: a sub-bacia Menino Deus IV como B1, a sub-bacia Menino Deus II como B2, a sub-bacia Sítio do Tio Pedro como B4 e as áreas diretas contribuinte ao reservatório como B3, B5 e B6; e a área de incremento João Goulart como B7.

Na figura 21 apresenta as delimitações das sub-bacias hidrográficas, as áreas diretas contribuintes ao reservatório e a área de incremento ao reservatório inseridos no modelo HEC-HMS 4.0 utilizados no balanço sedimentométrico com os respectivos trechos de rios e exutórios. Na tabela 4 estão apresentadas as identificações das sub-bacias e suas respectivas áreas.

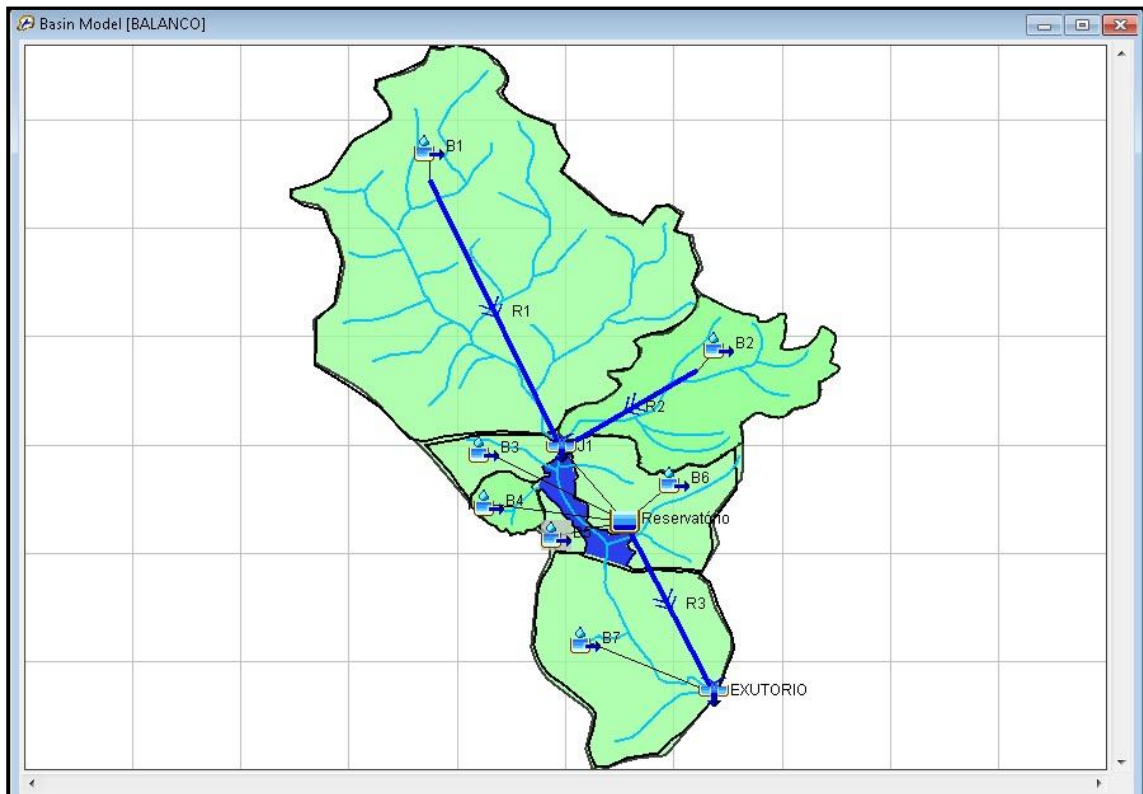


Figura 21 – Esquematização das áreas que correspondem ao balanço sedimentométrico no reservatório do Vacacaí Mirim

Fonte: Do autor.

Tabela 4 – Identificação das áreas correspondentes ao balanço sedimentométrico no reservatório do Vacacaí Mirim

Sub-bacias	Área contribuinte ao reservatório?	Estação de Monitoramento	Área (Km ²)
B 1	Sim	Menino Deus IV	18,79
B 2	Sim	Menino Deus II	5,02
B 3	Sim		0,914
B 4	Sim	Sítio do Tio Pedro	0,53
B 5	Sim		0,269
B 6	Sim		2,71
B 7	Não	João Goulart	5,78

Fonte: Do autor.

Foram caracterizadas todas as áreas de contribuição ao reservatório e a área de incremento para a utilização como dados iniciais do programa HEC-HMS como

vai ser demonstrado nos próximos itens. Essas características foram obtidas de trabalhos anteriores, alguns realizados recentemente e são apresentados no item a seguir.

3.2.1.1 Caracterização das sub-bacias

As sub-bacias hidrográficas foram caracterizadas quanto as suas características físicas, pedológicas e de uso e ocupação do solo. Estas características são importantes para entender o comportamento hidrossedimentológico em uma bacia, assim podendo executar o balanço sedimentométrico com a maior confiabilidade possível no programa HEC-HMS.

Na tabela 5 estão representadas as características físicas das sub-bacias Menino Deus IV (B1), Menino Deus II (B2), Sítio do Tio Pedro (B4) e área de incremento João Goulart (B7).

Tabela 5 – Características físicas das sub-bacias

Características físicas	B1	B2	B4	B7
Área (Km²)	18,79	5,02	0,53	5,78
Declividade média (%)	22,64	28,92	26,8	26,8
Comprimento de rampa (Km)	0,66	0,188	0,086	0,59
Comprimento do rio principal (Km)	7,43	3,87	0,89	2,86
Fator de forma (Kf)	0,28	0,335	0,669	0,71
Coefficiente de compacidade (Kc)	1,27	1,87	1,46	1,13
Tempo de concentração (min.)	96,6	54	6,87	65

Fonte: Extraído de Bellinaso (2002) e Paranhos (2003).

A tabela 6 apresenta os tipos de solos existentes em cada sub-bacias com suas respectivas áreas de ocorrência. Pode-se observar que o tipo de solo predominante é o Re4 com 44,82% e 74,85% abrangendo as áreas, Menino Deus IV

(B1) e Menino Deus II (B2), respectivamente. Outro tipo de solo predominante é o Pba1 com 55,6% e 59,17% abrangendo as áreas das sub-bacias Sítio do Tio Pedro (B4) e João Goulart (B7), respectivamente. O solo Re4 (Solo Litólico Eutrófico Relevo Montanhoso) é considerado solo raso, onde a profundidade raramente excede a 15 cm e é sempre inferior a 50 cm. O Horizonte “A” repousa diretamente sobre a rocha matriz ou sobre um horizonte “C” em evolução. Possui textura variável e fertilidade variável: caráter distrófico ou eutrófico. As rochas vulcânicas básicas, especialmente os basaltos, constituem o material de origem destes solos (BRASIL, 1973, p.267).

O solo Pba1 (Podzólico Bruno- Acinzentado Álico) ocorre na unidade geomórfica parte baixa (depressão), caracterizando regiões com solos pouco profundos, com profundidades entre 50 e 100 cm (BELLINASSO, 2002).

Tabela 6 – Classificação pedológica dos solos das sub-bacias

Tipo de solo*	B1		B2		B4		B7	
	Área (Km ²)	(%)	Área (Km ²)	(%)	Área (Km ²)	(%)	Área (Km ²)	(%)
Re4	8,425	44,82	3,76	74,85	–	–	–	–
Rd1	1,118	5,95	–	–	–	–	–	–
Re-C-Co	5,913	31,46	0,48	9,54	0,136	25,26	0,83	14,36
Tba-Rd	2,786	14,82	0,74	14,71	–	–	–	–
PBa1	–	–	–	–	0,299	55,6	3,42	59,17
Re3	–	–	–	–	0,103	19,14	1,53	26,47
C1	0,551	2,93	0,05	0,9	–	–	–	–

Fonte: Modificado de Azolin; Mutti (1988), Paranhos (2003), Pereira (2010).

*Re4: Solo Litólico Eutrófico Relevo Montanhoso;

Rd1: Neossolo Litólico Distrófico ondulado;

Re-C-Co: Associação Neossolo Litólico Eutrófico Chernossólico-Cambissolo-Colúvius;

TBa-Rd: Associação Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico Alissólico e Neossolo Litólico Eutrófico;

PBa1: Podzólico Bruno- Acinzentado Álico;

Re3: Solo Litólico Eutrófico Relêvo Forte Ondulado e

C1: Cambissolo Eutrófico e Distrófico.

Na tabela 7 estão apresentados os usos e ocupação do solo com suas proporções existentes em cada sub-bacia de acordo com a classificação geral do uso e ocupação do solo. Observa-se a predominância da vegetação em quase todas as sub-bacias seguida das áreas ocupadas pela agricultura e pastagem. Na sub-bacia João Goulart (B7) há maior predominância das áreas ocupadas pela urbanização correspondendo 41% de sua área.

Tabela 7 – Uso e ocupação do solo das sub-bacias

Uso e ocupação do solo	B1		B2		B4		B7	
	Área (Km ²)	(%)	Área (Km ²)	(%)	Área (Km ²)	(%)	Área (Km ²)	(%)
Vegetação	10,58	56,6	3,21	63,82	0,33	62,26	1,82	31,49
Água	0,09	0,5	–	–	–	–	–	–
Agropastoril	7,95	42,6	1,66	33	0,08	15,09	1,14	19,72
Solo Exposto	–	–	–	–	0,05	10,26	0,46	7,96
Urbanização	0,05	0,3	0,16	3,18	0,07	13,21	2,37	41

Fonte: Extraído de Paranhos (2003), Bastos (2007), Pereira (2010) e Sousa (2012).

3.2.2 Reservatório do Vacacaí Mirim

O reservatório do Vacacaí Mirim contém um barramento constituído de material argilo-arenoso com resistência e permeabilidade próprias para constituir maciço homogêneo de barragens de terra; e com formato trapezoidal com um talude de montante de 1:3,5 de inclinação, de jusante 1:3 e uma plataforma de 10,0 m de largura no coroamento (DNOS, 1961). A cota do nível máximo da represa é de 132,50 m e foi determinada tendo como referência à cota do terreno da subestação da Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE). A crista do vertedor e o coroamento da barragem estão nas cotas 132,00 m e 135,00 m, respectivamente, e o seu volume útil é de $3,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ (MARINS, 2004).

Conforme Marins (2004), o vertedor do reservatório é do tipo descarga livre com lâmina aderente e crista larga. Seu formato é curvo, possui um comprimento de

150 m e permite uma capacidade de descarga de 263 m³/s. O canal de descarga, calculado para suportar um volume três vezes maior que a máxima descarga prevista em aproximadamente 30 anos, tem largura inicial de 9,00 m chegando à bacia amortecedora com 14,00 m. Esta possui 14,00 m de largura por 18,00 m de comprimento e é dotada de dentes para garantir o afogamento do ressalto hidráulico.

No reservatório do Vacacaí Mirim foram executadas três batimetrias: a primeira realizada no ano de 1961; a segunda no ano de 1997, realizada pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (GHIDROS) da Universidade Federal de Santa Maria, em um período de forte estiagem, chegando o nível d'água do reservatório a ficar 5,0 m abaixo da cota do vertedor e a última em 2001 realizada também pelo GHIDROS (MARINS, 2004).

3.2.3 Discretização dos dados de entrada no modelo HEC-HMS

As séries de entrada do modelo foram discretizados conforme os períodos existentes de curvas-chaves das estações fluviométricas e estações pluviométricas abrangente de cada sub-bacia. Nos itens abaixo vão ser demonstrados os períodos utilizados em cada sub-bacias e na bacia inteira.

3.2.3.1 Série de Precipitação

Para a série de pré-calibração para as sub-bacias Menino Deus IV (B1) e Menino Deus II (B2) foram utilizados os dados de precipitação da estação pluviométrica Sítio do Maciel nos períodos de 2 de Setembro de 2011 a 05 de Janeiro de 2012 com intervalo de tempo de um dia. Já para a sub-bacia Sítio do Tio Pedro (B4) utilizou-se os dados da estação pluviométrica Campestre do Menino Deus nos períodos de 17 de Julho de 2003 a 28 de Novembro de 2003 com intervalo de um dia. E para a sub-bacia João Goulart (B7) foram utilizados os dados da

estação pluviométrica Sítio do Maciel nos períodos de 30 de Janeiro a 16 de Junho de 2014 com intervalos de um dia.

A série de calibração da bacia inteira foi utilizada o período de 30 de Janeiro a 16 de Junho de 2014 com intervalos diários. E para a série de validação foi utilizado o período de 17 de Junho a 10 de Novembro de 2014. Todos os dados de precipitação foram retirados do banco de dados do GHIDROS.

3.2.3.2 Série de Evapotranspiração

Os dados de evapotranspiração foram calculados com o programa Sistema para Manejo da Agricultura Irrigada (SMAI) que calcula a evapotranspiração de referência diária pelo Método de Penman Monteith. Para a execução deste cálculo foi adquirido os dados de Temperatura Máxima, Temperatura Mínima, Umidade Relativa Máxima, Umidade Relativa Mínima, Pressão e Velocidade do Vento no banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o mesmo período de estudo de cada sub-bacia e calculados para os intervalos de tempo correspondentes. Os valores resultantes do cálculo de evapotranspiração foram comparados com os de Feltrin (2013) para corrigir alguns extremos de evapotranspiração.

3.2.3.3 Série de Vazão

Os dados de cota foram retirados do banco de dados mantido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (GHIDROS) da Universidade Federal de Santa Maria para o cálculo da vazão. Assim conjuntamente com as curvas-chaves de cada sub-bacia foram calculadas as vazões observadas. As curvas-chaves são apresentadas a seguir:

1) Curva-chave da sub-bacia Menino Deus IV (B1) de acordo com Grutka (2013):

$$Q = 12,83 \cdot H^2 - 5,385 \cdot H + 0,585, \quad \text{para } 0,20 \leq H \leq 0,3 \text{ m}, \quad (2)$$

$$Q = 19,13 \cdot H^2 - 11,45 \cdot H + 1,884, \quad \text{para } 0,3 < H \leq 0,795 \text{ m}, \quad (3)$$

onde, **H**, é a cota (m); **Q**, é a vazão (m³/s).

2) Curva-chave da sub-bacia Menino Deus II (B2) de acordo com Souza (2012):

$$Q = 3,3409 \cdot H^{2,2606}, \quad \text{para } 0,06 \leq H \leq 0,7624, \quad (4)$$

onde, **H**, é a cota (m); **Q**, é a vazão (m³/s).

3) Curva-chave da sub-bacia Sítio do Tio Pedro (B4) de acordo com Belló (2004):

$$Q = 0,387 \cdot H^{1,6772}, \quad \text{para } H \leq 26 \text{ cm}, \quad (5)$$

$$Q = 0,003 \cdot H^{3,1851}, \quad \text{para } H > 26 \text{ cm}, \quad (6)$$

onde, **H**, é a cota (cm); **Q**, é a vazão (L/s).

4) Curva-chave da Estação Fluviométrica sedimentométrica João Goulart (B7):

$$Q = 12,34 (H - 0,029)^{1,664}, \quad (7)$$

onde, **Q**, é a vazão (m³/s); **H**, é a cota (m).

3.2.3 Calibração hidrológica do modelo HEC-HMS

Primeiramente foi realizada a pré-calibração das variáveis hidrológicas do modelo para a obtenção dos parâmetros otimizados. Esta pré-calibração foi executada individualmente para cada sub-bacia (B1, B2, B4 e B7) com suas respectivas características e dados de entradas. Já nas áreas de contribuição direta (B3, B5 e B6) não foi realizado a pré-calibração por não existirem estações de monitoramento no local, neste caso foram utilizadas para as estimativas nestas áreas considerando os parâmetros pré-calibrados da sub-bacia Sítio do Tio Pedro para as áreas B3 e B5 e os parâmetros pré-calibrados da sub-bacia Menino Deus II para a área B6.

Depois foi realizada a calibração do modelo com os dados de todas as áreas de contribuição incluindo os parâmetros pré-calibrados das sub-bacias (B1, B2, B4 e B7), nesta calibração foi executada a otimização com uma função objetivo escolhida como vai ser descrita no item a seguir.

3.2.3.1 Otimização das sub-bacias

A otimização é a calibração automática do programa HEC-HMS 4.0. O processo inicia pela estimativa dos parâmetros iniciais procurando o melhor que se ajuste com a vazão observada. Para isso são utilizados dois tipos de algoritmos para minimizar as funções objetivos, o *Univariate-gradiente* (ajusta um parâmetro de cada vez mantendo os outros constantes) e o *Nelder and Mead* (ajusta os parâmetros simultaneamente utilizando as interações anteriores e compara para achar o melhor ajuste).

A função objetivo serve para medir o melhor ajuste da saída do modelo com a vazão observada no elemento selecionado. Para isso o programa HEC-HMS 4.0 disponibiliza oito funções objetivos, dentre estas foi utilizado o algoritmo *Univariate-gradiente* e a função objetivo *Percent Error Volume* para a otimização automática do modelo.

3.2.4 Simulação do balanço sedimentométrico com HEC-HMS

Na simulação do balanço de sedimentos no reservatório foram utilizados os parâmetros hidrológicos calibrados e os métodos de cálculos selecionados como está apresentado na tabela 8.

Tabela 8 – Métodos de cálculos da simulação do balanço sedimentométrico no reservatório

Elementos Hidrológicos	Tipos de Cálculos	Métodos
Sub-bacia	Cobertura vegetal	Cobertura vegetal Simples
	Superfície do solo	Superfície do solo Simples
	Infiltração	SCS Curva Número
	Escoamento superficial	Hidrograma SCS
	Escoamento de base	Recessão
Trecho de rio	Propagação da vazão	Muskingum-cunge
	Perdas e ganhos	Constante
	Sedimentos	Razão do volume
Reservatório	Estrutura de Saída	Armazenamento: Cota - volume
	Sedimentos	Retenção completa de sedimentos

Fonte: Do autor.

No elemento hidrológico sub-bacia é calculada as perdas da precipitação por interceptação vegetal e da superfície do solo, evaporação e infiltração. E também são calculadas a transformação da precipitação em escoamento e a separação deste escoamento em superficial e de base.

O cálculo da interceptação da precipitação pela cobertura vegetal e superfície do solo é realizado pelos métodos de Cobertura vegetal Simples e Superfície do solo Simples. Depende de dois parâmetros iniciais a percentagem de água inicial na vegetação e no solo e o máximo de água há ser armazenada na vegetação e no solo.

O método *SCS Curve Number* selecionado para o cálculo da perda por infiltração, que é calculada pelo excesso de precipitação em função da precipitação acumulada, cobertura do solo, uso da terra e umidade antecedente (Equação 8).

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (8)$$

onde, P_e , é o excesso de precipitação acumulada durante o tempo t ; P , é a profundidade de precipitação acumulada no tempo, I_a , é a perda inicial, a perda inicial para pequenas bacias pode ser estimada pela relação empírica de I_a e S sendo $I_a = 0,2S$; S , é o potencial máximo de retenção do solo, pode ser calculado pela equação 9.

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad (9)$$

No programa HEC-HMS este método depende de dois parâmetros iniciais: perda inicial e o valor de CN, que pode ser estimado pelas tabelas encontradas na literatura (USACE-HEC, 2000).

O método *SCS Unit Hydrograph* foi selecionado para o cálculo de transformação da precipitação em escoamento superficial. Baseia-se no hidrograma unitário sintético triangular que propaga o volume gerado da separação do escoamento até o rio (TUCCI, 2005). No programa HEC-HMS utiliza um parâmetro para o método *SCS Unit Hydrograph* que é o *lag time*, indica o tempo entre o centro de massa do excesso de água da chuva e o pico do hidrograma.

O método de *Recession* selecionado para o cálculo do escoamento de base depende de três parâmetros iniciais, a vazão de base inicial (m^3/s), a constante de recessão (constante de decaimento exponencial) e a taxa de escoamento (m^3/s). O método é definido pela relação do escoamento de base em um instante t , para um valor inicial como está demonstrado na equação 10 (USACE-HEC, 2000).

$$Q_t = Q_0 K^t \quad (10)$$

Em que, Q_t , é o escoamento de base em um instante t ; Q_0 , é o escoamento de base inicial (no tempo zero); K , é uma constante de decaimento exponencial.

Para o cálculo do transporte potencial de sedimentos foi selecionado o método de *Yang*, para o cálculo da velocidade de queda foi selecionado o método de *Rubey*. E também foram inseridos os valores padrões de peso específico dos sedimentos, densidade específica da argila, silte, areia e cascalho.

O método de cálculo erosão selecionado foi o *Modified USLE* que depende 7 parâmetros iniciais: fator de erodibilidade, fator topográfico, fator de uso e manejo do solo, fator de práticas conservacionista, limite mínimo de escoamento que causa erosão (m^3/s), expoente, utilizado para distribuir a carga de sedimentos em um sedimentogram, e curva granulométrica do solo do leito do rio. Este método calcula a perda de solo média, em períodos longos, provenientes da erosão laminar e por sulcos e é expressa pela equação 11.

$$Y = R.K.LS.C.P \quad (11)$$

em que, **Y**, é a perda de solo (ton/ha.ano); **R**, é o fator de escoamento (m^3/s); **K**, é o fator de erodibilidade do solo (ton.h/mj.mm); **LS**, é o fator topográfico do comprimento de rampa e o grau de declividade; **C**, é o fator do uso e manejo do solo; **P**, é o fator de práticas conservacionistas.

O fator de escoamento é calculado pela equação 12.

$$R = 89,6 (Q_s \cdot q_p)^{0,56} \quad (12)$$

em que, **Q_s**, é o volume de escoamento superficial (m^3); **q_p**, é a vazão de pico (m^3/s).

No elemento rio foram selecionados os métodos *Muskingum-cunge* para calcular a propagação da precipitação no trecho de rio, o *Constant* para calcular as perdas e ganhos de precipitação e o método Razão do *Volume* para calcular o transporte de sedimentos no rio.

O método *Muskingum-cunge* é baseado em parâmetros físicos, o comprimento do rio, a declividade média do rio, o **n** de Manning (parâmetro de rugosidade do rio), a forma da seção transversal (trapezoidal), largura inferior do rio, inclinação lateral da seção. A solução do modelo baseia-se na combinação da conservação da massa e a representação difusão da conservação do momento (USACE-HEC, 2013).

O método *Constante* depende de dois parâmetros iniciais, a taxa de escoamento e a fração. Este método baseia-se em uma relação empírica para calcular a perda de água no canal utilizando uma redução fixa da taxa de escoamento (é a quantidade de água escoada a ser subtraída pelo escoamento que entra no trecho de rio) e uma fração (é usada para reduzir linearmente o escoamento de entrada em relação à taxa de escoamento). Este escoamento reduzido será a vazão de saída do canal (USACE-HEC, 2013).

O método *Razão do volume* baseia-se na relação do transporte de sedimentos com o escoamento no trecho de rio, calcula a porcentagem de sedimento disponível que sai no trecho de rio para cada intervalo de tempo assumindo como sendo igual à proporção de fluxo de água que sai no mesmo intervalo. Depende de quatro principais parâmetros iniciais, a curva granulométrica inicial do sedimento de leito, que define a distribuição dos sedimentos de leito pelo tamanho do grão no início da simulação; a largura do leito que é utilizada no cálculo do volume das camadas superiores e inferiores do leito; a profundidade do leito que representa a profundidade máxima de mistura ao longo do tempo; fator de leito ativo que é usado para calcular a espessura da camada de fundo do modelo de leito. Em cada intervalo de tempo, a espessura da camada de fundo é calculada como o D90 do sedimento de leito, multiplicado pelo fator de leito ativo (USACE-HEC, 2013).

No elemento hidrológico reservatório foi selecionado o método *estrutura de saída e retenção completa de sedimentos* para o cálculo dos sedimentos no reservatório.

No método *estrutura de saída* depende de vários parâmetros iniciais como: as condições iniciais, nível de água a jusante do reservatório, canal ou saída auxiliar do reservatório, comportamento do tempo na propagação no reservatório, bueiros, vertedores, bombas, extravasor da barragem, rupturas da barragem, infiltração da barragem, comportas e evaporação da barragem. Neste caso foi considerado como estrutura de saída do reservatório somente o vertedor. Não foi considerado nenhuma perda de água por infiltração e evaporação.

No item vertedor foram adicionados os parâmetros iniciais que neste método são dependentes como tipo de material (concreto ou terra), profundidade do canal de aproximação, perda de energia ou bacia de amortecimento, elevação da crista, comprimento da crista, altitude da parte inferior da estrutura do vertedor e largura total da parte inferior da estrutura do vertedor.

3.2.4.1 Desempenho do modelo

O modelo utiliza para verificar o desempenho das simulações através do coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NS) que é calculado pela equação 13.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{nt} [Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t)]^2}{\sum_{t=1}^{nt} [Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}(t)]^2} \quad (13)$$

Onde, $Q_{obs}(t)$, é a vazão observada no passo de tempo t ; $Q_{sim}(t)$, é a vazão simulada; e $\bar{Q}_{obs}(t)$, é a média de vazões observadas de todo o período de simulação nt .

Esse coeficiente é uma medida normalizada, podendo variar entre $-\infty$ e 1, que compara o erro quadrático médio gerado pela simulação de um modelo com a variância da série definida como meta (GERITINA et al. 2011). Os valores de NS entre 0,0 e 1,0 são geralmente vistos como níveis aceitáveis de desempenho, enquanto $NS \leq 0$ indica que a média do valor observado é melhor preditor significativo do que o valor simulado, o que indica um desempenho inaceitável (MORIASI et al., 2007).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados do monitoramento hidrossedimentométrico realizado na estação fluviométrica e sedimentométrica João Goulart no período de janeiro a novembro de 2014, a obtenção da curva-chave da descarga líquida e sólida, a relação da concentração de sedimentos em suspensão com a turbidez e granulometria do material de fundo e em suspensão. São descritos e discutido os resultados da aplicação do balanço sedimentométrico realizado no reservatório do Vacacaí Mirim.

4.1 Precipitação

Os dados de precipitação foram obtidos pelas estações pluviométricas Rancho do Amaral e Sítio do Maciel no período de janeiro a dezembro de 2014.

Na estação pluviométrica Rancho do Amaral foi registrado neste período cerca de 2830 mm, com maior precipitação registrada no mês de junho de 2014 de 511 mm e a menor precipitação registrada no mês de novembro de 94 mm.

Na estação pluviométrica Sítio do Maciel foi registrado no mesmo período um total de 2464 mm, sendo registrada a maior precipitação no mês de junho de 2014 com 371 mm e a menor no mês de novembro com 67 mm.

No gráfico da figura 22 podem-se observar os registros de precipitação com as variações no período de estudo.

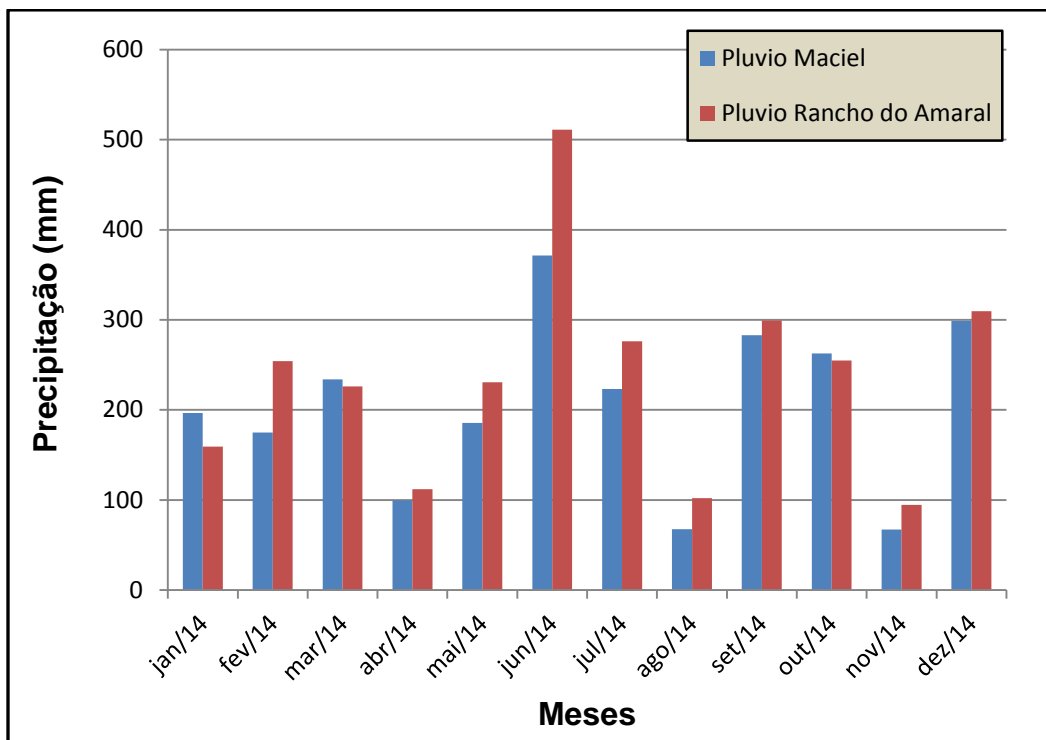


Figura 22 – Precipitações registradas nas estações pluviométricas Rancho do Amaral e Sítio do Maciel nos períodos de janeiro de 2014 a dezembro de 2014

Fonte: Do autor.

4.2 Medição da descarga líquida na estação

Na estação fluviométrica e sedimentométrica João Goulart foram realizadas 19 medições de vazões, no período de 11 de fevereiro de 2014 a 21 de novembro de 2014, no qual foram observadas vazões máximas e mínimas de 11,209 m³/s e 0,045 m³/s, respectivamente. A tabela 9 apresenta os valores das cotas com suas respectivas vazões observadas na seção.

Tabela 9 – Medições da descarga líquida com seus valores de cota e vazões observadas na seção João Goulart no período de fevereiro a novembro de 2014

Medições	Data	Cota (m)	Vazão (m ³ /s)
1	11/02/2014	0,09	0,050
2	19/03/2014	0,40	0,971
3	31/03/2014	0,31	0,618
4	05/05/2014	0,52	2,028
5	12/05/2014	0,17	0,251
6	13/06/2014	0,17	0,346
7	17/07/2014	0,65	5,208
8	17/07/2014	0,71	6,710
9	23/07/2014	0,97	10,688
10	02/09/2014	0,49	4,731
11	02/09/2014	0,30	1,070
12	02/09/2014	0,51	3,901
13	30/09/2014	0,68	8,000
14	06/10/2014	0,43	3,784
15	06/10/2014	0,48	3,289
16	17/10/2014	0,83	8,924
17	17/10/2014	0,85	7,489
18	30/10/2014	0,92	11,209
19	21/11/2014	0,03	0,045

Fonte: Do autor.

Com as medições de vazão e do nível da seção foi possível determinar a curva-chave da seção transversal de monitoramento João Goulart para o ano de 2014 como está apresentada na figura 23. Esta relação entre a cota e a vazão medida resulta na equação 14.

$$Q = 12,34 (H - 0,029)^{1,664} \quad (14)$$

$$R^2 = 0,9583$$

onde, **Q**, vazão (m³/s); **H**, cota (m).

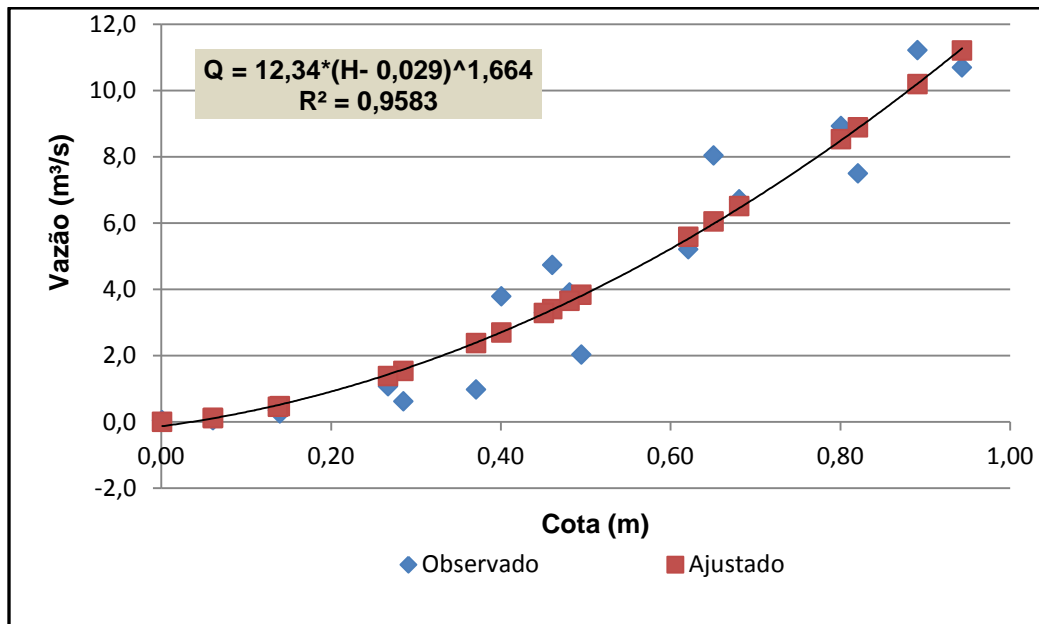


Figura 23 – Curva-chave da estação João Goulart

Fonte: Do autor.

4.3 Medição da descarga sólida em suspensão

Na estação João Goulart foram realizadas medições de 8 eventos de cheia totalizando 171 amostragens de concentração de sedimentos em suspensão com o amostrador ISCO (Apêndice C) nos períodos 17 de julho de 2014 a 30 de outubro de 2014.

A curva-chave de sedimentos foi determinada pela relação da descarga sólida em suspensão e a descarga líquida como é observado na figura 24 ou pela concentração de sedimentos em suspensão e a descarga líquida como está apresentado na figura 25. As relações entre a descarga sólida e a descarga líquida estão representadas nas equações 15, 16 e 17 e as que relacionam a concentração e a descarga líquida estão representadas pelas equações 18, 19 e 20.

$$Q_{SS} = 3,356e^{0,531 \cdot Q} \text{ para } Q \leq 3,95 \quad (15)$$

$$R^2 = 0,932$$

$$Q_{SS} = 8,291Q + 3,95 \text{ para } 3,95 < Q \leq 13,934 \quad (16)$$

$$R^2 = 0,956$$

$$Q_{SS} = -253,8Q + 13,93 \text{ para } 13,934 < Q \leq 16,731 \quad (17)$$

$$R^2 = 0,983$$

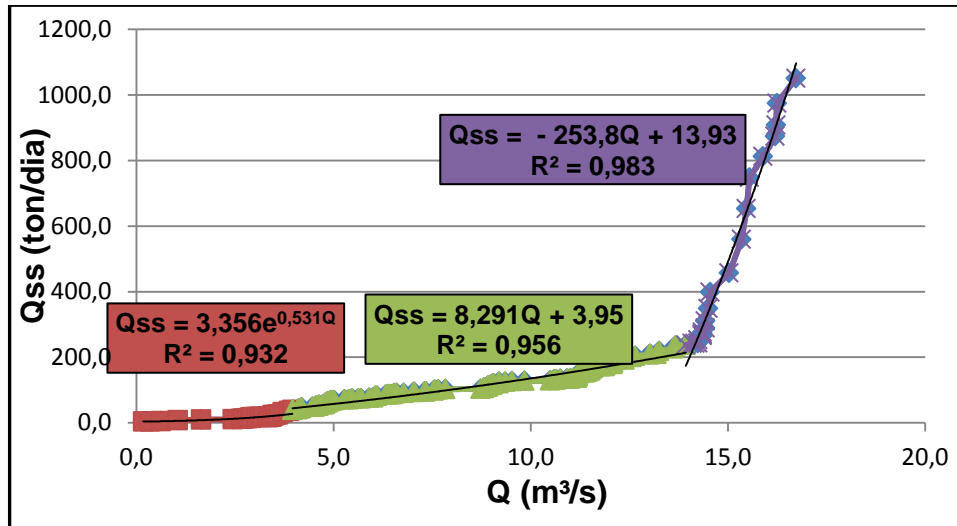


Figura 24 – Curva-chave de sedimentos em suspensão da seção transversal da Estação João Goulart

Fonte: Do autor.

$$C_{SS} = 16,47Q + 10,59 \text{ para } Q \leq 10,592 \quad (18)$$

$$R^2 = 0,935$$

$$Q_{SS} = 0,289Q^{2,683} \text{ para } 10,592 < Q \leq 14,169 \quad (19)$$

$$R^2 = 0,975$$

$$Q_{SS} = 23,40Q^2 - 190,4Q + 14,16 \text{ para } 14,169 < Q \leq 16,731 \quad (20)$$

$$R^2 = 0,941$$

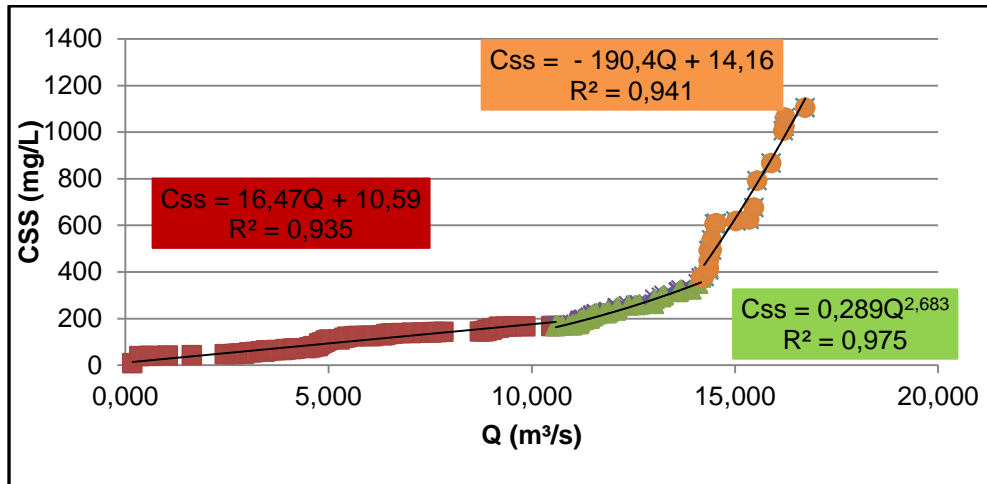


Figura 25 – Curva-chave de sedimentos em suspensão da seção transversal da estação fluviossedimentométrica João Goulart

Fonte: Do autor.

4.4 Correlação da C_{ss} e Turbidez

Para a obtenção da correlação da concentração de sedimentos em suspensão e o sinal de turbidez foram realizadas as amostragens de sedimentos com o amostrador ISCO ao lado da sonda de turbidez instalada na seção como foi demonstrados nos itens 3.1.6.1 e 3.1.6.2. Foram identificados somente 4 dos 8 eventos observados que estavam com a sonda de turbidez instalada em campo, isso se deve aos eventos extremos que ocorreram neste ano ocasionando danificação da sonda no local e a sua reinstalação.

A concentração de sedimentos em suspensão foi determinada em laboratório após a coleta e os dados de turbidez foram baixados do registrador datalogger e relacionados entre si, utilizando uma correlação direta (1:1) das variáveis conforme Pereira (2010).

No evento do dia 2 de setembro de 2014 foi encontrado uma correlação entre as variáveis da concentração de sedimentos e o sinal de turbidez de 0,476 como é demonstrado no gráfico da figura 26. Foi possível gerar uma equação relacionando as duas variáveis como é representada na equação 21.

$$C_{SS} = 3,064.T - 22,18 \quad (21)$$

$$R^2 = 0,476$$

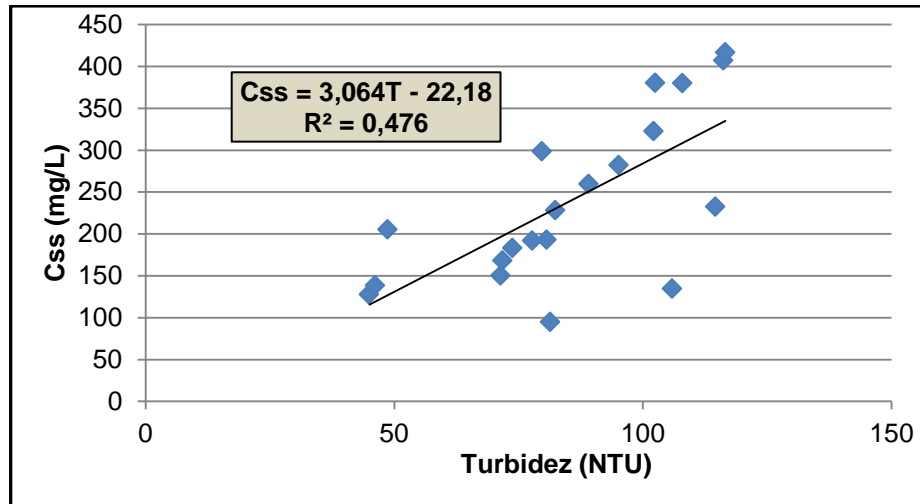


Figura 26 – Correlação da C_{ss} e a Turbidez no evento do dia 2 de setembro de 2014 na Estação João Goulart

Fonte: do autor.

No evento do dia 12 de setembro de 2014 obteve-se uma maior correlação entre as variáveis sendo de 0,955 como é demonstrado no gráfico da figura 27. A equação 22 expressa essa relação de concentração de sedimentos em suspensão e turbidez.

$$C_{SS} = 0,213 \cdot T^{1,612} \quad (22)$$

$$R^2 = 0,955$$

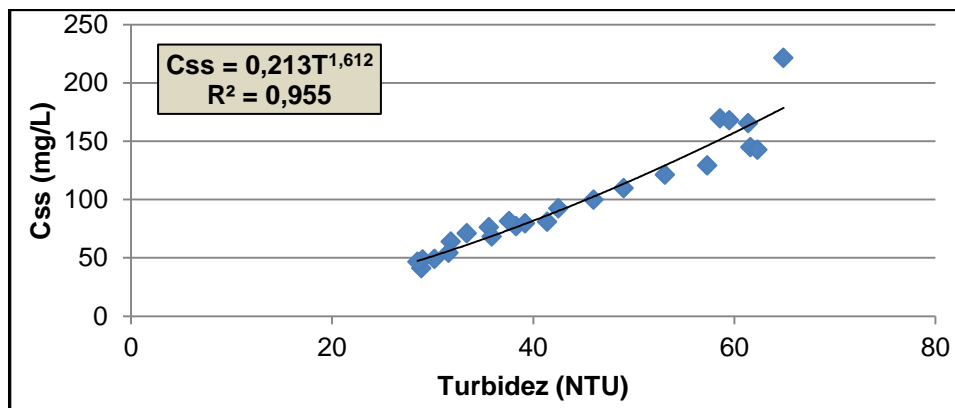


Figura 27 – Correlação da C_{ss} e a Turbidez do evento do dia 12 de setembro de 2014 na Estação João Goulart

Fonte: Do autor.

No evento do dia 30 de setembro de 2014 obteve-se uma correlação de 0,964, sendo a maior de todos os eventos observados neste período. A figura 28 demonstra o gráfico e a equação 23 expressa essa relação (Css e Turbidez).

$$C_{SS} = 0,326.T + 34,26 \quad (23)$$

$$R^2 = 0,964$$

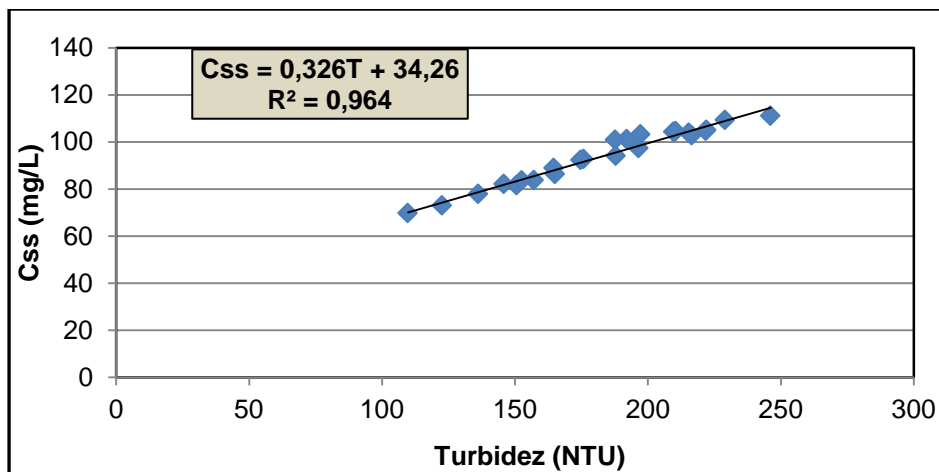


Figura 28 – Correlação da C_{SS} e a Turbidez do evento do dia 30 de setembro de 2014 na Estação João Goulart

Fonte: do autor.

No evento do dia 6 de outubro de 2014 obteve-se a menor correlação entre as variáveis sendo de 0,227, isso se deve ao fato da quantidade de resíduo que é levado com a enxurrada devido a estação ser influenciada por uma parte de ocupação urbana, esses resíduos muitas vezes se prendem ao sensor podendo prejudicar as leituras de turbidez. A figura 29 mostra o gráfico e a equação 24 expressa essa relação de C_{SS} e o sinal de turbidez.

$$C_{SS} = 0,777T + 29,93 \quad (24)$$

$$R^2 = 0,227$$

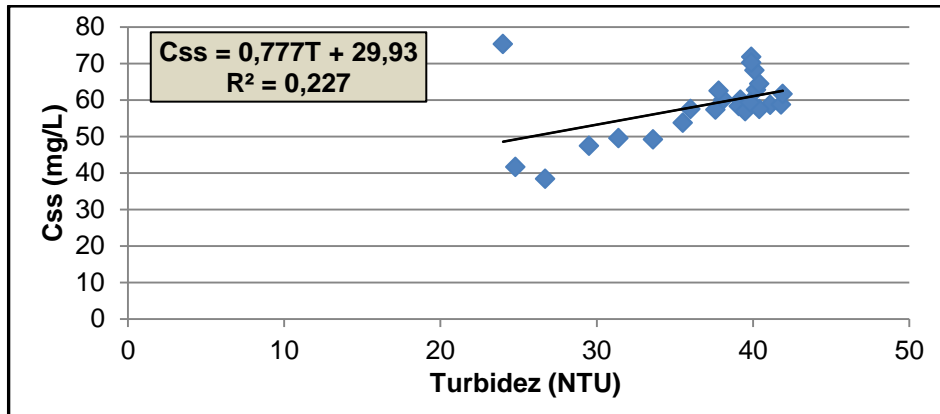


Figura 29 – Correlação da C_{ss} e a Turbidez do evento do dia 6 de outubro de 2014 na Estação João Goulart

Fonte: do autor.

Para a relação da concentração de sedimentos e turbidez na estação fluviossedimentométrica João Goulart foi pegos os dados das melhores correlações por eventos e relacionados conjuntamente para obter essa relação.

Essa relação de C_{ss} e Turbidez gerou uma equação (Equação 25) do tipo potencial representada pela linha de tendência identificada no gráfico com o coeficiente de determinação R^2 igual a 0,84 (Figura 30), indica uma boa correlação entre os parâmetros analisados, podendo ser uma boa alternativa para se ter dados contínuos de concentração de sedimentos em suspensão.

$$C_{ss} = 0,795 \cdot T^{1,229} \quad (25)$$

$$R^2 = 0,84$$

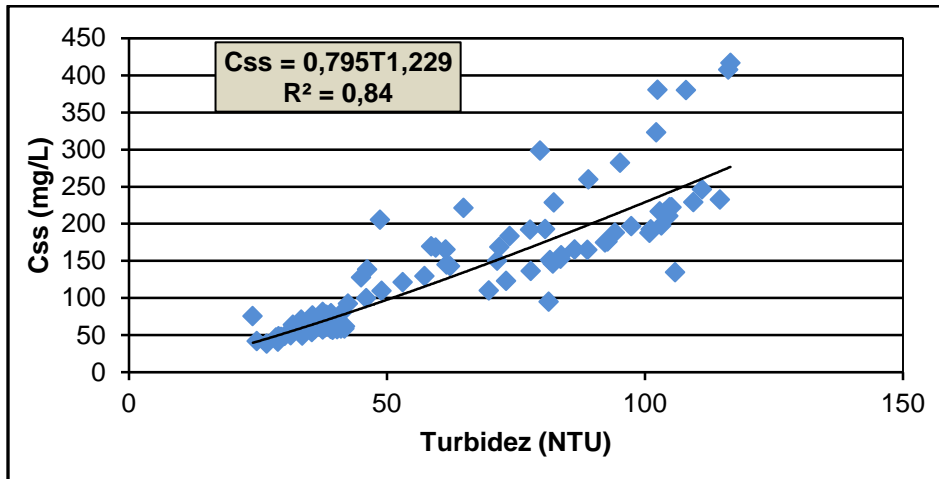


Figura 30 – Correlação da C_{ss} e a Turbidez na Estação fluviossedimentométrica João Goulart

Fonte: Do autor.

A determinação encontrada ($R^2 = 0,84$) foi superior ao valor obtido por Pereira (2010) com R^2 de 0,76 e 0,71 e inferior aos valores obtidos por Lopes et al. (2009), Manz, Santos e Paula (2011) e Grutka (2013) com R^2 igual a 0,93, 0,97 e 0,90, respectivamente.

4.5 Granulometria dos sedimentos

A granulometria dos sedimentos serve para descrever a distribuição e tipo de sedimento que está sendo transportado na área de estudo. Foram realizadas as classificações granulométricas dos materiais em suspensão e de arraste.

4.5.1 Sedimentos em suspensão

O material em suspensão coletados em campo foram submetidos à análise granulométrica em laboratório pelo método do tubo de retirada pela base, conforme descrito no item 3.1.7.2.1. Foram realizadas as classificações granulométricas para

os seguintes eventos: evento do dia 23/07/2014, evento do dia 02/09/14, evento do dia 12/09/2014, evento do dia 12/09/2014, evento do dia 06/10/2014 e o evento do dia 17/10/2014.

As tabelas 9, 10, 11, 12 e 13 mostram a distribuição granulométrica conforme a classificação simplificada da ABNT para cada amostra em eventos coletados.

Para os eventos dos dias 23/07/2014, 12/09/2014, 6/10/2014 e 17/10/2014 a maior porcentagem de material retido foi do tipo silte com 51,6%, 65,1%, 46,7% e 69,7%, respectivamente. Já para o evento do dia 02/09/2014 a maior porcentagem de material retido foi do tipo areia com 72,9%.

Tabela 10 – Classificação granulométrica dos sedimentos em suspensão do evento de 23/07/14 conforme a classificação simplificada da ABNT

Diâmetros (mm)	Material	% Retida
2,00 - 0,0625	Areia	38,6
0,0625 - 0,004	Silte	51,6
0,004 - 0,00024	Argila	9,8

Fonte: Do autor.

Tabela 11 – Classificação granulométrica dos sedimentos em suspensão do evento de 02/09/14 conforme a classificação simplificada da ABNT.

Diâmetros (mm)	Material	% Retida
2,00 - 0,0625	Areia	72,9
0,0625 - 0,004	Silte	22,3
0,004 - 0,00024	Argila	4,8

Fonte: Do autor.

Tabela 12 – Classificação granulométrica dos sedimentos em suspensão do evento de 12/09/14 conforme a classificação simplificada da ABNT

Diâmetros (mm)	Material	% Retida
2,00 - 0,0625	Areia	20,7
0,0625 - 0,004	Silte	65,1
0,004 - 0,00024	Argila	14,2

Fonte: Do autor.

Tabela 13 – Classificação granulométrica dos sedimentos em suspensão do evento de 06/10/14 conforme a classificação simplificada da ABNT

Diâmetros (mm)	Material	% Retida
2,00 - 0,0625	Areia	42,9
0,0625 - 0,004	Silte	46,7
0,004 - 0,00024	Argila	10,4

Fonte: Do autor.

Tabela 14 – Classificação granulométrica dos sedimentos em suspensão do evento de 17/10/14 conforme a classificação simplificada da ABNT

Diâmetros (mm)	Material	% Retida
2,00 - 0,0625	Areia	15,1
0,0625 - 0,004	Silte	69,7
0,004 - 0,00024	Argila	15,2

Fonte: Do autor.

Para todos os eventos foram traçadas as curvas granulométricas como estão representadas nas figuras 31, 32, 33, 34 e 35. Foram identificados os diâmetros característicos 50 e 90 %, que são denominados de D_{50} e D_{90} para todos os eventos.

No evento do dia 23/07/2014 foi obtido D_{50} igual a 0,0155 mm e D_{90} igual a 0,375 mm (Figura 45).

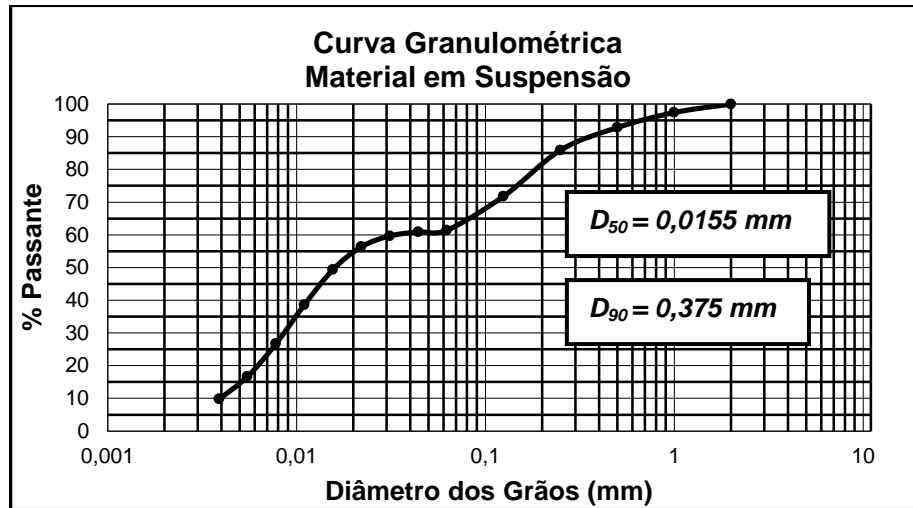


Figura 31 – Curva granulométrica dos sedimentos em suspensão do evento de 23/07/14

Fonte: Do autor.

No evento do dia 02/09/2014 foi obtido o D_{50} igual a 0,375 mm e D_{90} igual a 1,10 mm (Figura 46).

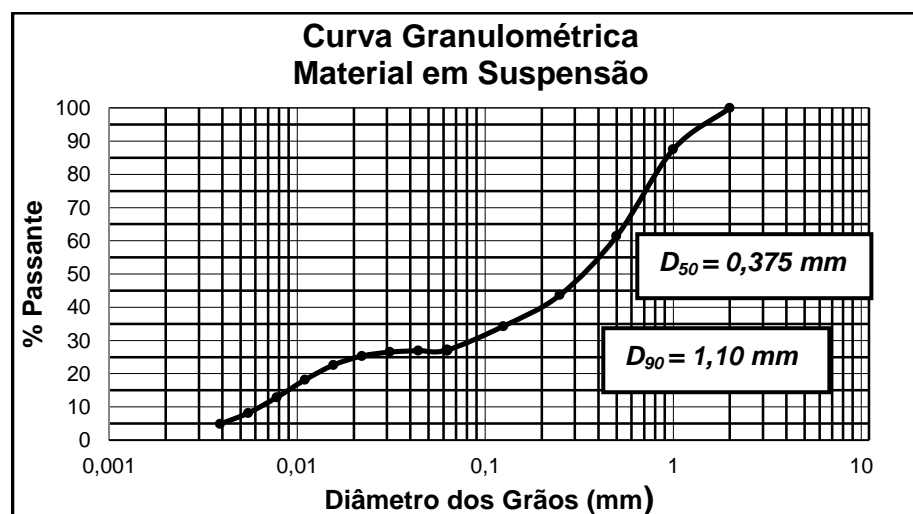


Figura 32 – Curva granulométrica dos sedimentos em suspensão do evento de 02/09/14

Fonte: Do autor.

No evento do dia 12/09/2014 foi obtido o D_{50} igual a 0,01 mm e D_{90} igual a 0,32 mm (Figura 47).

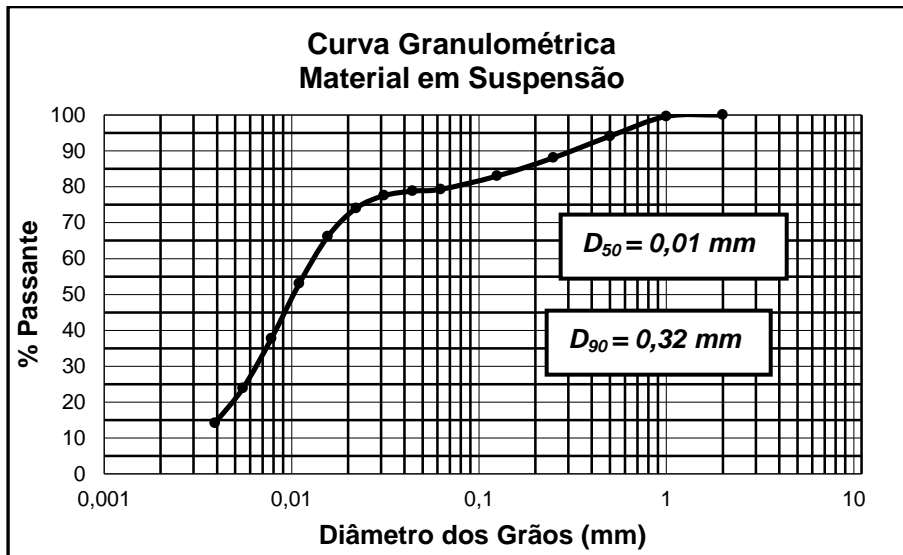


Figura 33 – Curva granulométrico dos sedimentos em suspensão do evento de 12/09/14

Fonte: Do autor.

No evento do dia 06/10/2014 foi obtido o D_{50} igual a 0,019 mm e D_{90} igual a 1,10 mm (Figura 48).

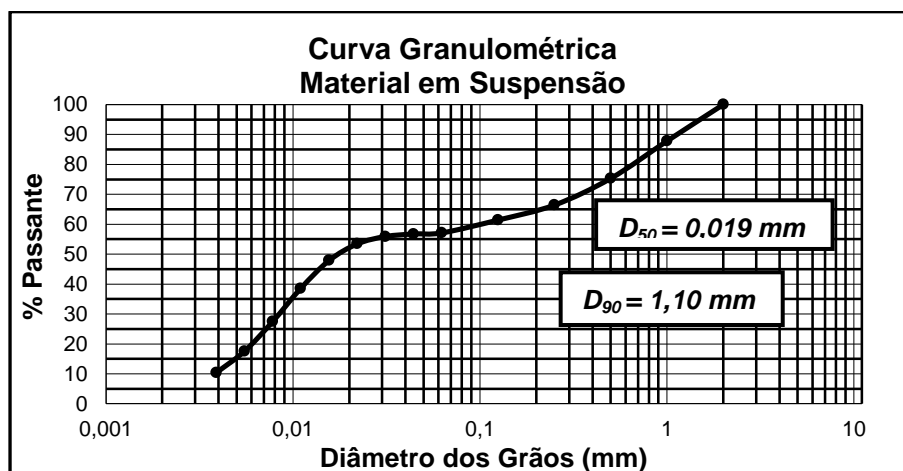


Figura 34 – Curva granulométrica dos sedimentos em suspensão do evento de 06/10/14

Fonte: Do autor.

No evento do dia 17/10/2014 foi obtido o D_{50} igual a 0,01 mm e D_{90} igual a 0,265 mm (Figura 49).

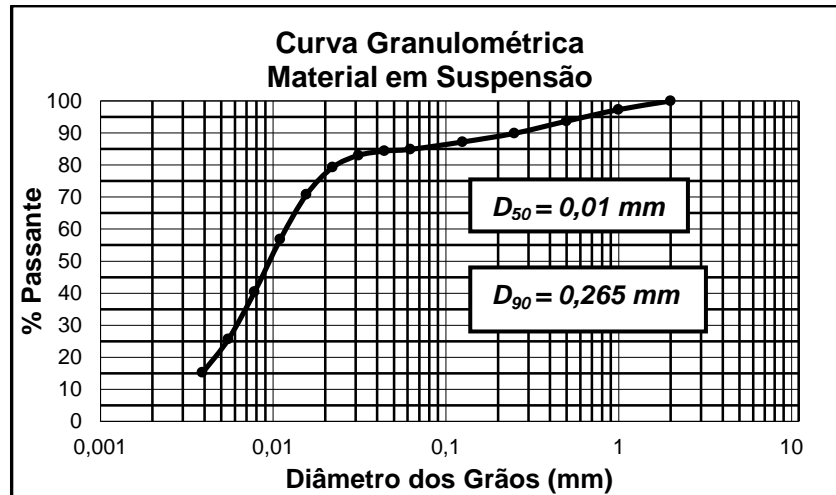


Figura 35 – Curva granulométrica dos sedimentos em suspensão do evento de 17/10/14

Fonte: Do autor.

4.5.2 Sedimento de fundo

Os materiais de fundo coletados em campo foram submetidos à análise granulométrica em laboratório pelo método do peneiramento, conforme descrito no item 3.1.7.3.1. Foram realizadas as classificações granulométricas para o evento do dia 23/07/2014 2/09/2014.

As tabelas 14 e 15 apresentam a classificação granulométrica conforme a classificação simplificada da ABNT para cada amostra em eventos coletados.

No evento do dia 23/07/2014 a maior porcentagem do material retido foi o do tipo areia com 56,77% e para o dia 02/09/2014 foi de areia com 97,8%.

Tabela 15 – Classificação granulométrica do material de leito do evento de 23/07/14 conforme a classificação simplificada da ABNT

Diâmetros (mm)	Material	% Retida
60 - 2,0	Pedregulho	43,2
2,00 - 0,0625	Areia	56,77
0,0625 - 0,00024	Silte e Argila	0,21

Fonte: Do autor.

Tabela 16 – Classificação granulométrica do material de leito do evento de 02/09/14 conforme a classificação simplificada da ABNT

Diâmetros (mm)	Material	% Retida
2,00 - 0,0625	Areia	97,8
0,0625 - 0,00024	Silte e Argila	2,32

Fonte: Do autor.

Para os dois eventos foram traçadas as curvas granulométricas como estão representadas nas figuras 36 e 37. Foram identificados os diâmetros característicos 50 e 90 %, que são denominados de D_{50} e D_{90} para todos os eventos.

No evento do dia 23/07/2014 foi obtido D_{50} igual a 0,266mm e D_{90} igual a 0,98 mm (Figura 36). Já no evento do dia 02/07/2014 só foi identificado o diâmetro característico D_{50} com valor igual a 0,266 mm (Figura 37).

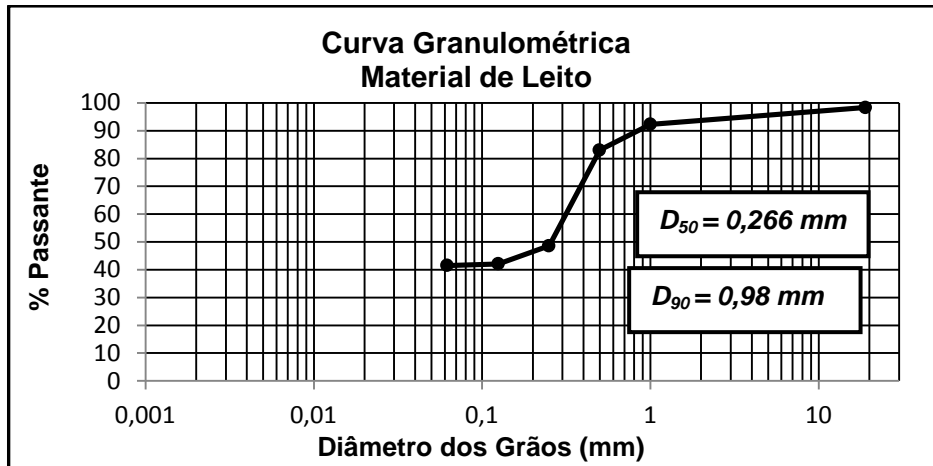


Figura 36 – Curva granulométrica dos sedimentos de leito do evento de 23/07/14

Fonte: Do autor.

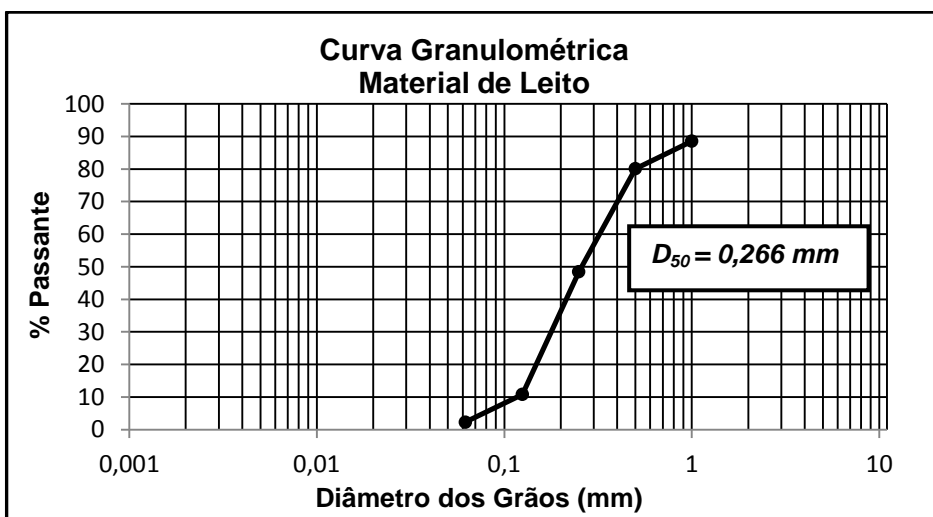


Figura 37 – Curva granulométrica dos sedimentos de leito do evento de 02/09/14

Fonte: Do autor.

4.6 Calibração do modelo

A calibração do modelo consistiu primeiramente na execução da otimização dos parâmetros hidrológicos de cada sub-bacia chamando-se de pré-calibração do modelo. Logo após, foi realizado a calibração com os parâmetros pré-calibrados anteriormente e realizado a otimização conjunta de todas as sub-bacias com a função objetivo escolhida, neste caso, *erro percentual do volume*. Ao simular foram

ajustados novamente os parâmetros, principalmente os mais sensíveis no modelo, como o *lag time*, *máximo armazenamento* da cobertura da superfície e *constante de recessão* tentando obter uma representação melhor dos picos do hidrograma e mantendo o volume igual ao observado.

Nos gráficos das figuras 38, 39, 40 e 41 estão apresentados os hidrogramas de resposta de cada sub-bacia, respectivamente, Menino Deus 4 (B1), Menino Deus 2 (B2), Sítio do Tio Pedro (B4) e João Goulart (B7). Estes hidrogramas são resultados da pré-calibração realizada no modelo.

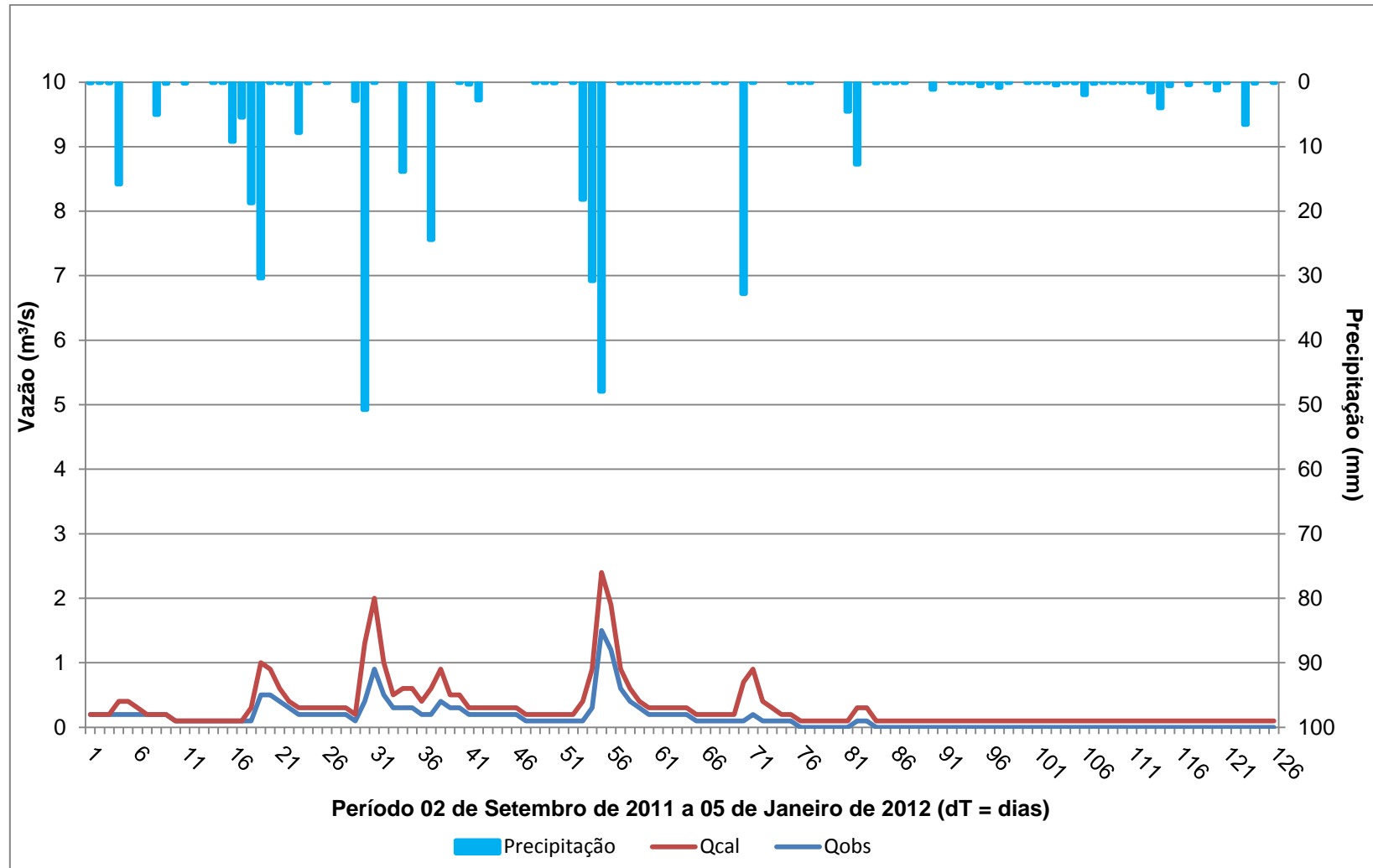


Figura 38 – Hidrograma de resposta da pré-calibração da sub-bacia Menino Deus 4 (B1) no período de 02 de setembro de 2011 a 05 de janeiro de 2012 com intervalos diários

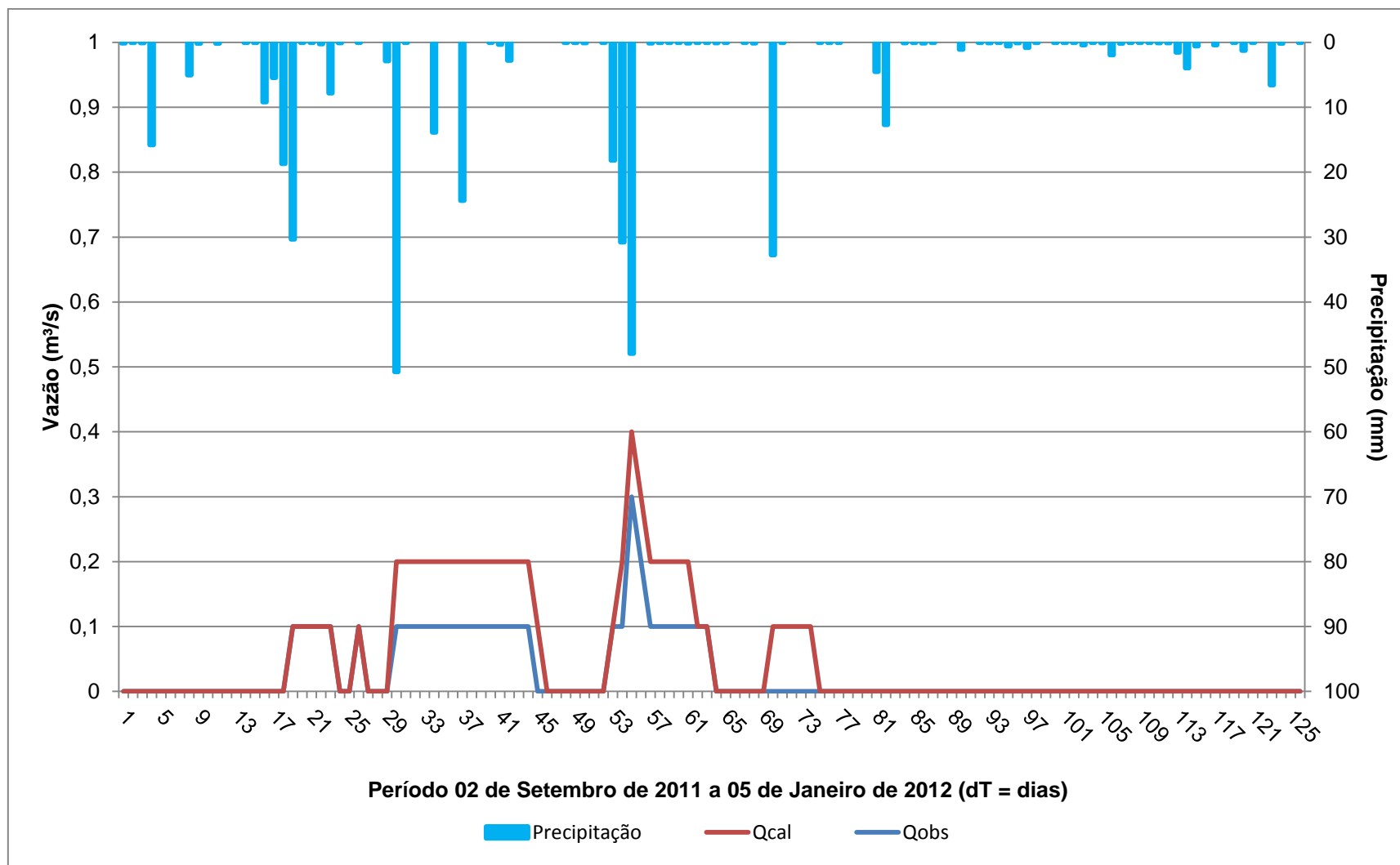


Figura 39 – Hidrograma de resposta da pré-calibração da sub-bacia Menino Deus 2 (B2) no período de 02 de setembro de 2011 a 05 de janeiro de 2012 com intervalos diários

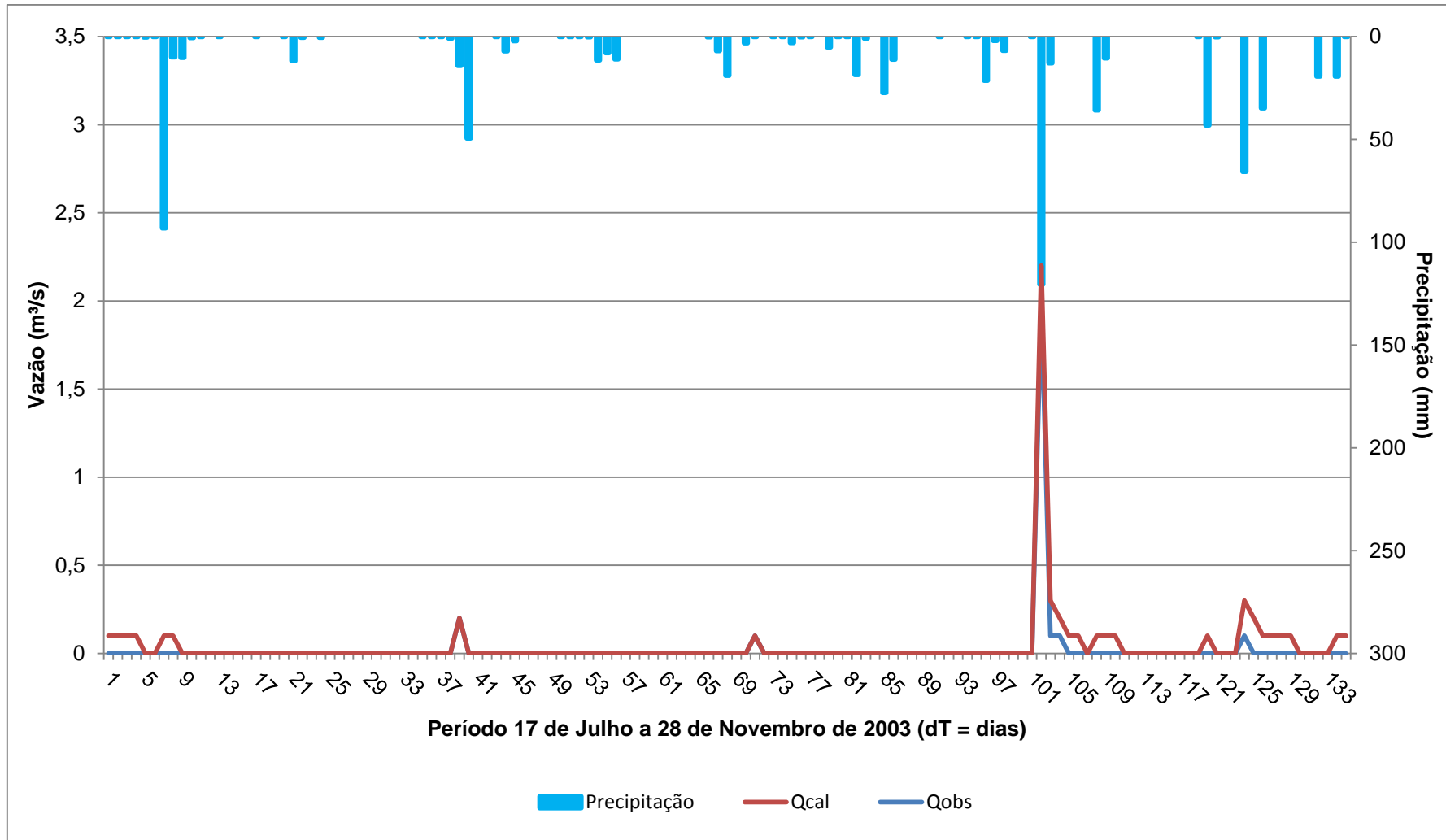


Figura 40 – Hidrograma de resposta da pré-calibração da sub-bacia Sítio do Tio Pedro (B4) no período de 17 de julho a 28 de novembro de 2003 intervalos diários

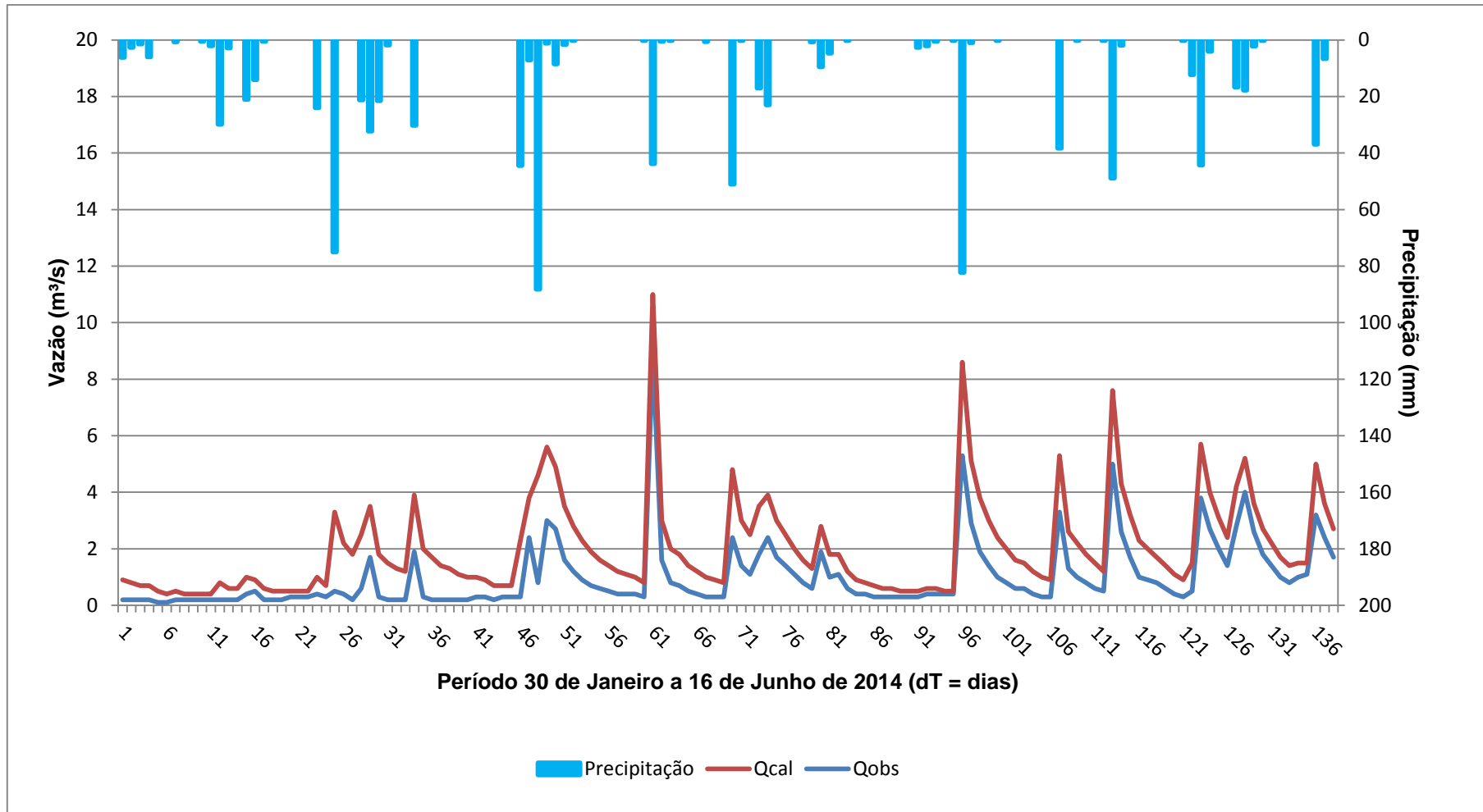


Figura 41 – Hidrograma de resposta da pré-calibração da sub-bacia João Goulart (B7) no período de 30 de janeiro a 16 de junho de 2014 intervalos diários

Observou-se que em todos os hidrogramas de resposta da pré-calibração as vazões calculadas pelo modelo foram superestimadas comparadas as vazões observadas de cada sub-bacia. Por isso foi realizado um novo ajuste com os melhores resultados da pré-calibração das sub-bacias. Como se podem observar os hidrogramas de resposta da calibração e da validação do modelo.

Nos gráficos da figura 42 e 43 estão representadas as simulações no exutório da bacia da série de calibração e validação do modelo hidrológico, onde se pode observar que alguns picos da série foram representados pela vazão simulada comparados com a vazão observada. Porém, não obteve resultado muito satisfatório na calibração hidrológica do modelo, mas pode dizer que é o primeiro passo para os futuros trabalhos levar em consideração os erros e acertos desta pesquisa.

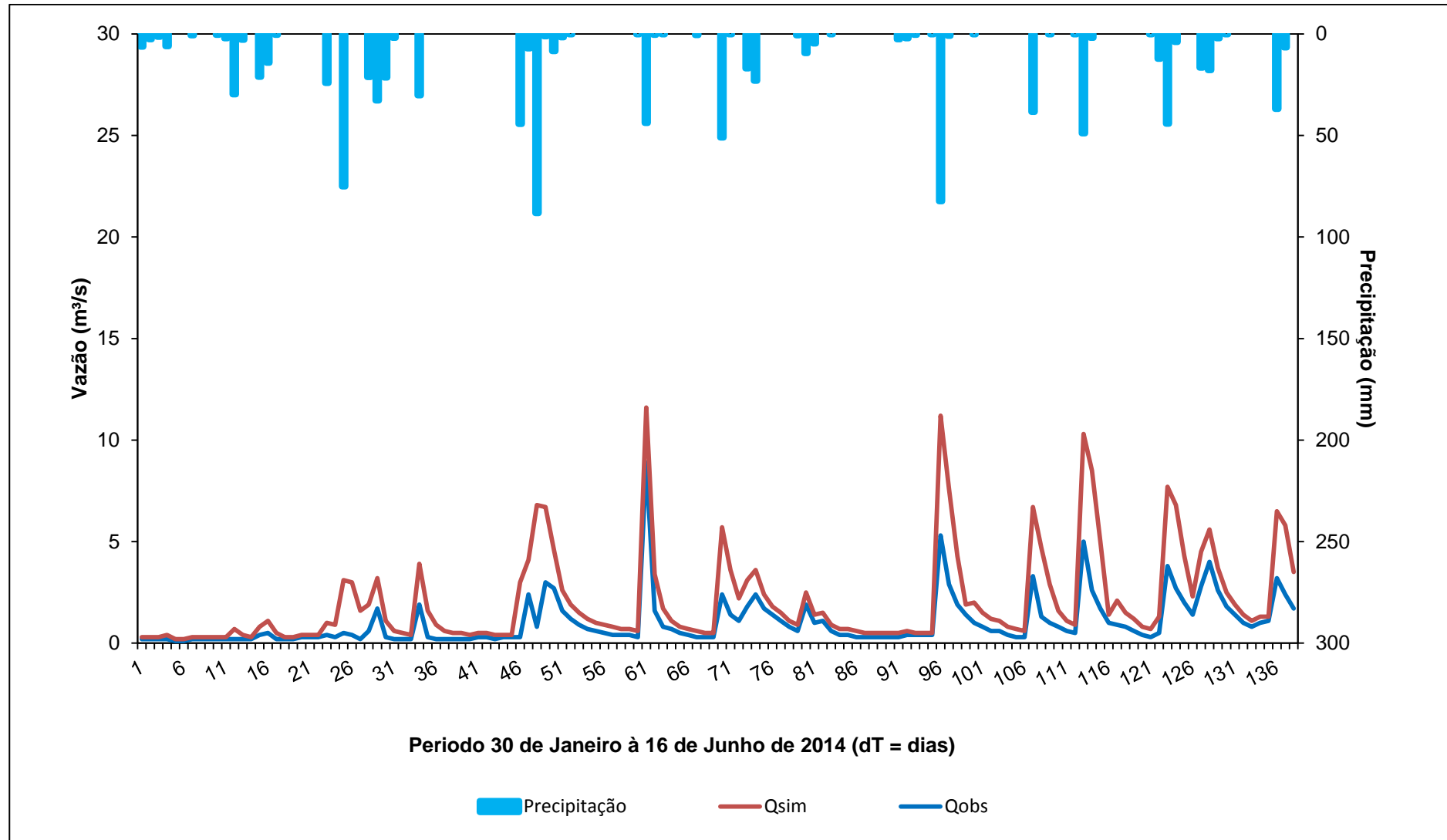


Figura 42 – Hidrograma de resposta da calibração do modelo hidrológico no período de 30 de janeiro a 10 de novembro de 2014 com intervalos diários

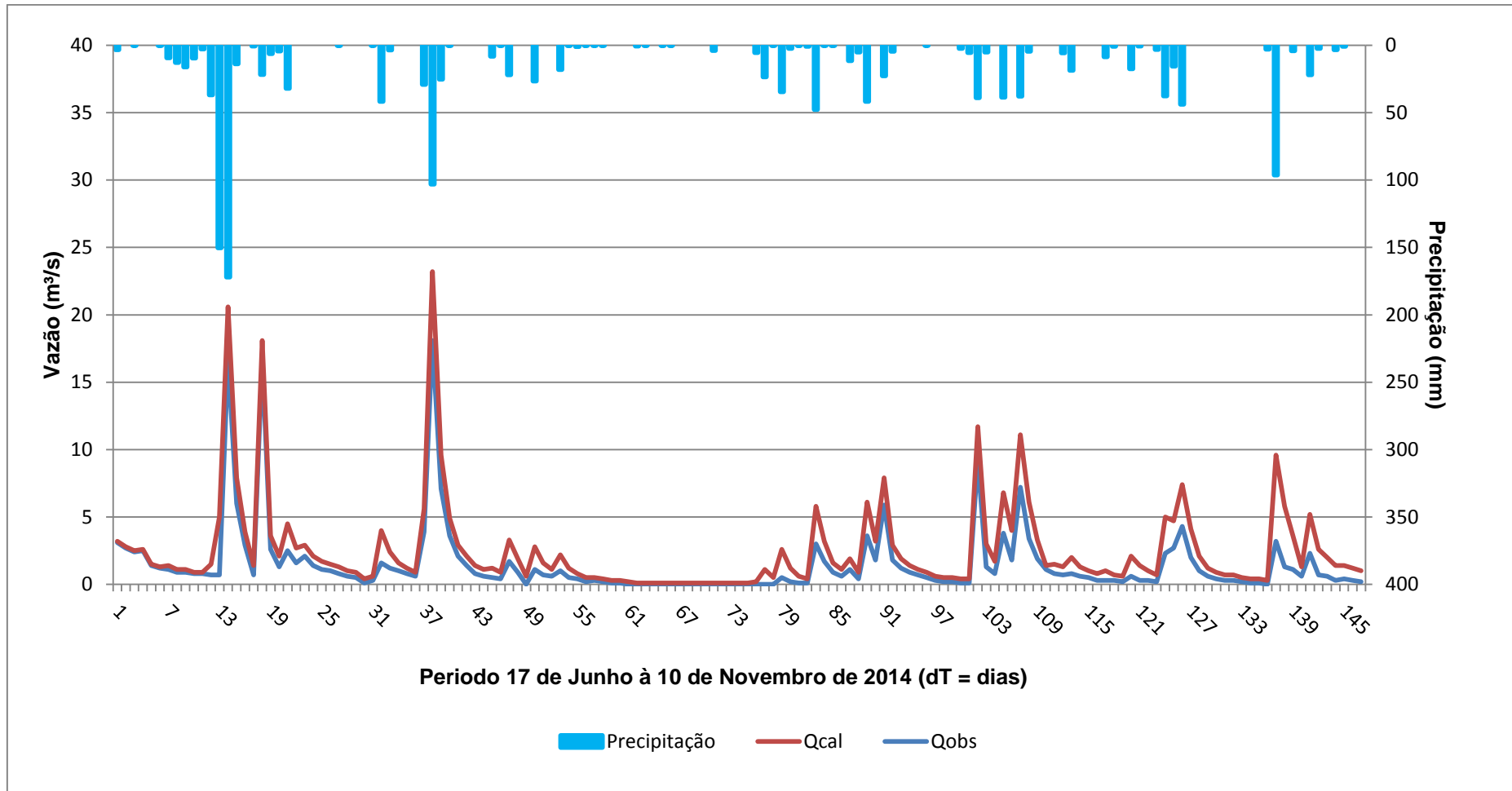


Figura 43 – Hidrograma de resposta da validação do modelo hidrológico no período de 17 de junho a 10 de novembro de 2014 com intervalo diário

Na tabela 17 pode-se observar o desempenho da primeira etapa que corresponde a pré-calibração e da segunda à calibração, compreendendo toda a simulação do balanço hidrológico, onde se obtém os valores de volume observados comparados com os simulados pelo modelo HEC-HMS para cada sub-bacia e o exutório da bacia total e seus respectivos valores de Nash-Sutcliffe.

Tabela 17 – Resultados simulados de volume comparados com o observado e o coeficiente de desempenho do modelo para a pré-calibração, calibração e a validação do modelo

Sub-bacias	Pré-Calibrados			Calibrados			Validados		
	Vol. Obs. (m ³)*	Vol. Sim. (m ³)*	NS*	Vol. Obs. (m ³)*	Vol. Sim. (m ³)*	NS*	Vol. Obs. (m ³)*	Vol. Sim. (m ³)*	NS*
B1	86,2	86,81	0,52				—	—	—
B2	77,69	77,6	0,53				—	—	—
B4	546,28	546,29	0,13				—	—	—
B7	2061,53	2061,62	0,37				—	—	—
Exutório	—	—	—	350,22	350,25	0,32	916,06	854,68	0,44

* Vol. Obs. = Volume observado.

Vol. Sim. = Volume simulado no modelo.

NS = Nash-Sutcliffe.

Os resultados do coeficiente de desempenho do modelo foram considerados aceitáveis para a modelagem hidrológica, pois os valores estão na faixa entre 0 e 1, demonstrando de acordo com Silva, Weerakoon e Herath (2014) um desempenho aceitável do simulado comparado com os observados da série. Nos valores de Nash-Sutcliffe de Pak et al. (2015) também encontraram valores nesta faixa para a calibração da modelagem hidrológica entre 0,22 a 0,69 e para a validação do modelo entre 0,60 a 0,80. Porém de acordo com Moriasi et al. (2007) para ser considerado uma boa simulação da descarga líquida em um modelo hidrológico o valor de Nash-Sutcliffe tem que ser superior a 0,5. Neste caso só as sub-bacias B1 e B2, com 0,52 e 0,53, respectivamente, conseguiram se aproximar deste valor.

Nas tabelas 18, 19 e 20 estão apresentados os valores de cada parâmetro hidrológico calibrado utilizado no modelo HEC-HMS 4.0 para a simulação do balanço de sedimentos.

Tabela 18 – Parâmetros hidrológicos calibrados

Elemento	Método	Parâmetro	Valores Calibrados	
Sub-bacia B1	Simple Canopy	Initial Storage (%)	0	
		Máximo Storage (mm)	13,463	
	SimpleSurface	Initial Storage (%)	0,3	
		Máximo Storage (mm)	50,321	
	Loss Method:	Initial Abstration (mm)	5,00332	
		SCS Curve Number	CN	35,12
	Transform Method:	SCS Unit Hydrograph	Lag Time (min)	1200
			Baseflow:	
	Recession		Initial Discharge (m ³ /s)	0,028812
			Ratio To Peak	0,1862
			Recession Constant	0,784
	B2	Simple Canopy	Initial Storage (%)	1,3333
			Máximo Storage (mm)	9,9361
		SimpleSurface	Initial Storage (%)	6,5007
			Máximo Storage (mm)	45,213
		Loss Method:	Initial Abstration (mm)	0,0388125
			SCS Curve Number	CN
Transform Method:		SCS Unit Hydrograph	Lag Time (min)	1200
			Baseflow:	
Recession			Initial Discharge (m ³ /s)	0,13316
			Ratio To Peak	0,1862
	Recession Constant		0,95	

Tabela 19 – Continuação dos parâmetros hidrológicos calibrados

Elemento	Método	Parâmetro	Valores Calibrados
B3	Simple Canopy	Initial Storage (%)	0,0895667
		Máximo Storage (mm)	0,6238
	SimpleSurface	Initial Storage (%)	91,943
		Máximo Storage (mm)	54,39
	Loss Method:	Initial Abstraction (mm)	0,0141885
	SCS Curve Number	CN	42
	Transform Method:		
	SCS Unit Hydrograph	Lag Time (min)	750
	Baseflow:		
	Recession	Initial Discharge (m ³ /s)	0,0736306
		Ratio To Peak	0,12667
		Recession Constant	0,784
	B4	Simple Canopy	Initial Storage (%)
Máximo Storage (mm)			29,22
SimpleSurface		Initial Storage (%)	5,6193
		Máximo Storage (mm)	54,662
Loss Method:		Initial Abstraction (mm)	0,0141885
SCS Curve Number		CN	41,16
Transform Method:			
SCS Unit Hydrograph		Lag Time (min)	1200
Baseflow:			
Recession		Initial Discharge (m ³ /s)	0,10824
		Ratio To Peak	0,1862
		Recession Constant	0,882
B5		Simple Canopy	Initial Storage (%)
	Máximo Storage (mm)		0,47825
	SimpleSurface	Initial Storage (%)	93,819
		Máximo Storage (mm)	36,819
	Loss Method:	Initial Abstraction (mm)	0,0141885
	SCS Curve Number	CN	42
	Transform Method:		
	SCS Unit Hydrograph	Lag Time (min)	753,62
	Baseflow:		
	Recession	Initial Discharge (m ³ /s)	0,0736333
		Ratio To Peak	0,12667
		Recession Constant	0,9

Tabela 20 – Continuação dos parâmetros hidrológicos calibrados

Elemento	Método	Parâmetro	Valores Calibrados	
B6	Simple Canopy	Initial Storage (%)	0	
		Máximo Storage (mm)	14,799	
	SimpleSurface	Initial Storage (%)	4,4222	
		Máximo Storage (mm)	45,181	
	Loss Method: SCS Curve Number	Initial Abstraction (mm)	0,0260044	
		CN	37	
	Transform Method: SCS Unit Hydrograph	Lag Time (min)	1200	
		Baseflow: Recession	Initial Discharge (m ³ /s)	0,21748
	Ratio To Peak		0,19	
	Recession Constant		0,931	
	B7	Simple Canopy	Initial Storage (%)	0
			Máximo Storage (mm)	0,41489
SimpleSurface		Initial Storage (%)	3,3333	
		Máximo Storage (mm)	4,7764	
Loss Method: SCS Curve Number		Initial Abstraction (mm)	0,13375	
		CN	60,287	
Transform Method: SCS Unit Hydrograph		Lag Time (min)	735	
		Baseflow: Recession	Initial Discharge (m ³ /s)	0,147
Ratio To Peak			0,12667	
Recession Constant			0,93	
Reach		Loss/Gain Method:	Flow Rate (m ³ /s)	0,02 - 0,3
R1		Constant	Fraction	0,1
R2	Routing Method: Muskingum-	Index Flow	0	
R3	Cunge	Manning's n	0,125	

4.7 Simulação do balanço sedimentométrico no reservatório

Neste item vão ser descritos os resultados das simulações de sedimentométricas que consistem a segunda etapa do balanço sedimentométrico no reservatório. Demonstrando o quanto de sedimento foi carregado até o reservatório, o quanto ficou armazenado e o quanto saiu do mesmo.

4.7.1 Entrada, armazenamento e saída de sedimentos no reservatório

Foram realizadas duas simulações do balanço de sedimentos no reservatório do Vacacaí Mirim: primeiro considerou todos os elementos hidrológicos, métodos já mencionados e parâmetros da MUSLE conforme apêndice C; o segundo foi realizado algumas modificações nos elementos hidrológicos, ou seja, foram retirados os elementos de trecho de rio (R1, R2 e R3) e alterado o valor limite de vazão do método da MUSLE conforme se pode observar no apêndice C. Ambos consideraram a retenção total de sedimentos no reservatório e utilizaram a série de precipitação no período de 04 de janeiro a 10 de novembro de 2014.

Os resultados das duas simulações podem ser observados nas tabelas 21 e 22.

Tabela 21 – Resultados da primeira simulação do balanço de sedimentos no reservatório do Vacacaí Mirim

Elementos	Área (Km ²)	Ton	Ton/dia	mm/ano	Observação
B1+B2	23,81	204784,2	660,5942	3,68	
B3	0,91	0,6	0,001935	2,82E-07	
B4	0,53	0,2	0,000645	1,62E-07	Entrada
B5	0,53	0	0	0	
B6	0,26	2,3	0,007419	3,79E-06	
Reservatório		204787,3	660,6042	3,68	Armazenamento
B7	5,78	135,9	0,438387	1,01E-05	Contribuição pós-reservatório
Exutório	31,82	32830,7	105,9055	1,01E-05	Saída

Fonte: Do autor.

Tabela 22 – Resultados da segunda simulação do balanço de sedimentos no reservatório do Vacacaí Mirim

Elementos	Área (Km ²)	Ton	Ton/dia	mm/ano	Observação
B1+B2	23,81	18,1	0,058	0,000325	
B3	0,91	0	0	0	
B4	0,53	0	0	0	Entrada
B5	0,53	0	0	0	
B6	0,26	0	0	0	
Reservatório		18,1	0,058	0,000325	Armazenamento
B7	5,78	11,5	0,037	0,000852	Contribuição pós-reservatório
Exutório	31,82	11,5	0,037	0,000852	Saída

Fonte: Do autor.

Pode-se observar, nas tabelas acima, que o total de sedimentos simulados nas sub-bacias de contribuição foi de 3,68 mm/ano para a primeira simulação e de 0,000325 mm/ano para a segunda, correspondendo a entrada de sedimentos no reservatório. Entre as duas simulações tem uma grande diferença de quantidade de sedimentos simulados, isso se deve ao limite de vazão atribuída nas simulações, sendo uma muito menor que a outra, ou seja, a primeira foi considerada um limite de 0,3 m³/s e na segunda de 3 m³/s. Outro fator que também pode ter contribuição direta na diminuição da carga de sedimentos simulada foi à retirada dos elementos hidrológicos trecho de rio.

Como foi considerado o método “completa retenção no reservatório”, ou seja, que a eficiência de retenção no reservatório seja de 100%, assim, tudo que gerou de sedimentos na bacia de contribuição foi retido no reservatório do Vacacaí Mirim. Porém, essa consideração é irreal porque a eficiência de retenção de 100% só existe em casos de lagos e não reservatórios onde há extravasor ou vertedor na saída do mesmo (BRUNE 1953). Geralmente os reservatórios têm uma eficiência de retenção de 90% considerando que o restante que sai sendo os sedimentos finos.

Esses resultados foram simulados somente com a calibração hidrológica do modelo, para ser mais preciso o ideal é fazer a calibração dos sedimentos com séries observadas nas sub-bacias de contribuição do reservatório e na saída do mesmo. Como observado por Pak et al. (2015) que afirmam que para se obter um nível de confiança do modelo tem que ter uma boa qualidade nos dados observados de fluxo e sedimentos na bacia de estudo.

5 CONCLUSÕES

Os estudos realizados para a caracterização da área que corresponde à estação fluviossedimentométrica João Goulart na sua primeira etapa pode-se apontar os seguintes resultados:

- Para a curva-chave obteve-se um bom ajuste, com um coeficiente de determinação igual a 0,96.
- A curva-chave de sedimentos em suspensão também obteve um bom ajuste. A relação entre a descarga sólida e a descarga líquida foi dividida em três partes: vazões menores ou iguais a 3,95 m³/s, obtendo um coeficiente de determinação de 0,93, vazões maiores que 3,95 m³/s até 13,934 m³/s, obtendo um coeficiente de determinação igual a 0,96, e para vazões maiores que 13,934 m³/s até 16,731 m³/s, obtendo um coeficiente de determinação igual a 0,98. A curva-chave que relaciona a concentração de sedimentos em suspensão e a descarga líquida também foi dividida em três partes: vazões menores ou iguais a 10,592 m³/s, obtendo um coeficiente de determinação igual a 0,94, vazões maiores que 10,592 m³/s ou menores e iguais a 14,169 m³/s, obtendo um coeficiente de determinação de 0,98 e para vazões maiores que 14,169 m³/s ou iguais a 16,731 m³/s, obtendo um coeficiente de determinação igual a 0,94.
- Para a relação da concentração de sedimentos em suspensão e a turbidez obteve-se um coeficiente de determinação igual a 0,84, sendo considerada uma boa correlação entre as variáveis.
- O material transportado em suspensão na área de estudo teve predomínio de silte, na maioria dos eventos amostrados, com variação de 46,7 % a 69,7%, enquanto que no material transportado em arraste foi predominante a areia, variando de 56,77 % a 97,8% nos dois eventos amostrados.

Esses resultados são importantes para o conhecimento e compreensão dos processos erosivos e de sedimentação na área de estudo. Assim, gerando informações concretas e fundamentais para um melhor gerenciamento dos recursos hídricos e oferecer mais subsídios aos futuros trabalhos na bacia hidrográfica de estudo.

A segunda etapa do estudo que foi a realização do balanço sedimentométrico no reservatório pode-se apontar os seguintes resultados:

- Calibração hidrológica obteve-se um coeficiente de desempenho do modelo NS entre 0,13 a 0,53 e a validação igual a 0,27. Não demonstrando um bom desempenho do modelo, pois conforme Moriasi et al. (2007) este coeficiente tem que ser acima de 0,5 para ser considerado um bom desempenho.
- Para o balanço de sedimentos no reservatório do Vacacaí Mirim foi considerado no modelo uma eficiência de retenção de sedimentos de 100% no mesmo, assim, tudo que foi produzido nas sub-bacias contribuintes ficou retido. Não sendo compatível com a realidade, pois conforme Brune (1953) a eficiência de um reservatório é de 90% de retenção de sedimentos.
- Para as duas simulações do balanço sedimentométrico pode se observar que houve diferença significativa entre os dois resultados. Assim, indicando que a sensibilidade do modelo está nos parâmetros da MUSLE, mais precisamente no limite de vazão. E também na alteração dos elementos hidrológicos, sendo considerados os trechos de rios somente na primeira simulação. Porém não se pode comprovar com a literatura e apenas observado nos resultados comparado no estudo.

A utilização de modelos hidrológicos serve como ferramenta para o gerenciamento de recursos hídricos buscando informações compatíveis com a realidade local para um melhor planejamento do mesmo. Assim, os resultados desta etapa da pesquisa servem como ferramenta e subsídios iniciais para as futuras pesquisas da área de sedimentos para pequenas bacias hidrográficas.

REFERÊNCIAS

ALÉSIO, M.; PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D. Produção de Sedimentos em Diferentes Escalas Espaço-Temporais de Duas Pequenas Bacias e um Lisímetro no Bioma Mata Atlântica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 4, p. 49-64, out/dez, 2012.

AZOLIM, L. S. M.; MUTTI, M. A. D. **Solos da Bacia Hidrográfica do Vacacaí-Mirim**. Relatório técnico. Acordo DNOS - UFSM (FATEC), 1987/88.

BELLÓ, S. L. **Avaliação do impacto da ocupação urbana sobre as características hidrosedimentométricas de uma pequena bacia hidrográfica de encosta**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

BRANCO, N. **Avaliação da produção de sedimentos de eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica rural de encosta**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, 1998.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. Boletim Técnico Nº 30. Recife, 431p., 1973.

BRUNE, G. M. **Trap efficiency of reservoirs**. American Geophysical Union, p. 407-418, 1953.

CARDOSO, A. T. **Estudos hidrossedimentológico em três bacias embutidas no município de Rio Negrinho-SC**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

CARDOSO, T. G. **Sensor de turbidez para análise de amostras de água**. 2011. Trabalho de conclusão de curso (Curso de Engenharia de Computação) - Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2011.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. Rio de Janeiro: Interciência. 599 p. 2008.

CISNEROS, J. M. et al. Assessing multi-criteria approaches with environmental, economic and social attributes, weights and procedures: A case study in the Pampas, Argentina. **Agricultural Water Management**, v. 98, p. 1545-1556, 2011.

DTS-12 SDI TURBIDITY SENSOR. Operating Manual. Revision 11, 2008.

GETIRANA, C. V. et al. Calibração e Validação de Modelo Hidrológico com Observações In: *Situ*, Altimetria e Gravimetria Espaciais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 1, p. 29-45, jan./mar. 2011.

GRIMM, A.; FERRAZ, S. E. T.; GOMES, J. Precipitation anomalies in Southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. **J. Climate**, v. 11, p. 2863-2880, 1998.

GRUTKA, L. **Estudo das relações entre descargas sólidas e líquidas obtidas por meio de diferentes métodos de medição**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

GUO, Y.; ASCE, M.; MARKUS, M. Analytical Probabilistic Approach for Estimating Design Flood Peaks of Small Watersheds. **J. Hydrol. Eng.**, v. 16, n. 11, p. 847-857, Nov. 2011.

HALWATURA, D.; NAJIM, M. M. M. Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. **Environmental Modelling & Software**, v.46, p.155-162, 2013. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.03.006>>. Acesso em: 4 June. 2014.

HASSAN et al. Suspended sediment balance for the mainstem of Changjiang (Yangtze River) in the period 1964-1985. **Hydrological Processes**. v. 25, p. 2339-2353, 2011.

HEGEDÜS, P.; CZIGÁNY, S.; BALATONYI, L.; PIRKHOFFER, E. Analysis of Soil Boundary Conditions of Flash Floods in a Small Basin in SW Hungary. **Central European Journal of Geosciences**, v. 5, n. 1, p.97-111, 2013.

HOGAN, D. M. et al. Mitigating the effects of landscape development on streams in urbanizing watersheds. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 50, n. 1, p. 163-178, Feb., 2014.

Hydrologic Engineering Center. **Hydrologic modeling system HEC-HMS user's manual**. Davis, CA: U.S. Army Corps of Engineers. 2013.

LIMA, J. E. F. W.; LOPES, W. T. A.; OLIVEIRAFILHO, E. C.; MARTINS, E. S.; REATTO, A.; SILCA, E. M.; MINIZ, D. H. F. **Avaliação de método pontual de coleta de amostras hidrossedimentométricas em pequenos cursos de água**. In: IX Encontro Nacional de Sedimentos. Brasília. 2010.

LOPES, G. R. et al. **Reflexões sobre a elaboração e a aplicação de curva-chave de sedimentos em pequenas bacias**. In: LIMA, J. E. F.; LOPES, W. T. A. (Org.). Engenharia de Sedimentos: na busca de soluções para problemas de erosão e assoreamento. Brasília: ABRH, cap. 8, p. 141-155, 2011.

LOPES, G. R. et al. Estudo sobre correlação entre turbidez e sólidos em suspensão para estimativa da vazão sólida em uma pequena bacia. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 18, **Anais...** Campo Grande: ABRH, 2009.

MACEDO, R. L. **Estudo hidrológico da bacia do rio negrinho – SC utilizando o HEC-HMS**. 2010. Trabalho de conclusão de curso (Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

MANZ, R. E.; SANTOS, I.; PAULA, E. V. Avaliação do comportamento do transporte de sedimentos em suspensão por meio de monitoramento automático da turbidez. In: LIMA, J. E. F.; LOPES, W. T. A. (Org.). **Engenharia de Sedimentos**: na busca de soluções para problemas de erosão e assoreamento. Brasília: ABRH, cap. 9, p. 159- 173, 2011.

MEENU, R.; REHANA, S.; MUJUMDAR, P. P. Assessment of hydrologic impacts of climate change in Tunga–Bhadra river basin, India with HEC-HMS and SDSM. **Hydrological Processes**, v. 27, p. 1572-1584, 2013.

MERTEN, G. H. et al. **Determinação da concentração de sedimentos em suspensão em rios com o uso do turbidímetro**. Curso. CPRM, IPH-UFRGS. Porto Alegre, 2011.

MINEAR, J. T.; KONDOLF, G. M. Estimating reservoir sedimentation rates at large spatial and temporal scales: A case study of California. **Water Resources Research**, v. 45, p. 1-8, 2009. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007WR006703/pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2014.

MINELLA, J. P. G. Avaliação parâmetros hidrossedimentométricos numa bacia do Rio Grande do Sul. **Revista Eletrônica de Recursos Hídricos**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas: UFRGS. v. 1 n. 1, 2004.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Monitoramento de bacias hidrográficas para identificar fontes de sedimentos em suspensão. **Ciências Rurais**, Santa Maria, v. 41, n. 3, p. 424-432, mar. 2011.

MINELLA, J. P. G. et al. Identificação e implicações para a conservação do solo das fontes de sedimentos bacia hidrográficas. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1637-1646, 2007.

MOREIRA, J. E. **Estudos Sedimentológicos do Rio Madeira**. PJ-0576-G3-GR-RL-0001. 2007.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. Australia: Blackwell publishing. 3. ed. 304 p. 2005.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Trans. ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MOURA, A, G. et al. **Relatório**. 7º Curso Internacional de Medição de Descarga Líquida em Grandes Rios. Manaus e Manacapuru, ANA/CPRM, 2008.

NAVRATIL, O. et al. Global uncertainty analysis of suspended sediment monitoring using turbidimeter in a small mountainous river catchment. **Journal of Hydrology**, v. 398, p. 246-259, 2011.

PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D.; PARANHOS, R. M. Produção de Sedimentos em Pequenas Bacias Hidrográficas Rurais. In: PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D. (Ed.). **Caracterização Quali-Quantitativa da Produção de Sedimentos**. Santa Maria: ABRH: UFSM, p. 35-51, 2000.

PAK, J. H. et al. Modeling Surface Soil Erosion and Sediment Transport Processes in the Upper North Bosque River Watershed, Texas. **Journal of Hydrologic Engineering**, 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584. 0001205.

PARANHOS, R. M. **Avaliação de metodologia para a estimativa de produção de sedimentos em uma pequena bacia rural de encosta**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

PAULA, G. M. Influência do fenômeno El Niño na erosividade das chuvas na região de Santa Maria (RS). **R. Bras. Ci. Solo**, v. 34, p. 1315-1323, 2010.

PEREIRA, M. A. **Processos hidrossedimentológicos em diferentes escalas espaço temporais no bioma mata atlântica**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

PICCO, L. et al. An Update of the Magnitude-Frequency Analysis of Rio Cordon (Italy) Bedload Data after 25 Years of Monitoring. **Internat. Assoc. Hydrol. Sci. Publ.**, n. 356, p. 65-71, 2012.

RIVER SURVEYOR S5/M9 SYSTEM MANUAL, 2014.

SANTOS, C. G. **Erosão hídrica e taxa de entrega de sedimentos na bacia hidrográfica semiárida do riacho exú, PE.** 2013. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2013.

SANTOS, I. et al. **Hidrometria aplicada.** Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001.

SILVA, M. M. G. T.; WEERAKOON, S. B.; HERATH, S. Modeling of Event and Continuous Flow Hydrographs with HEC–HMS: Case Study in the Kelani River Basin, Sri Lanka. **J. Hydrol. Eng.**, v. 19, p. 800-806, Apr. 2014.

SUN, H.; CORNISH, P. S.; DANIELL, T. M. Turbidity-based erosion estimation in a catchment in South Australia. **Journal of Hydrology**, v. 253, p. 227-238, 2001.

TELEDYNE ISCO. 3700 Portable Samplers: Installation and Operation Guide. 2013.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos.** Porto Alegre: Ed. UFRGS/ABRH, 2. ed., 678 p. 2005.

WALLING, D. E. The sediment delivery problem. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 65, p. 209-237, 1983. Disponível em: http://www.wou.edu/las/physci/taylor/g473/refs/walling_1983.pdf. Acesso em: 18 nov. 2007. doi: 0022-1694/83.

WALLING, D. E.; COLLINS, A. L. **Integrated Assessment of Catchment Sediment Budgets: A Technical Manual.** Department for International Development: Exeter. Walling DE, Webb BW. 2000.

WARRICK, J. A. Trends in the suspended-sediment yields of coastal rivers of northern California, 1955–2010. **Journal of Hydrology**, v. 489, p. 108-123, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.041>>. Acesso em: 25 set. 2014.

WILLIAMS, J. R. Sediment routing for agricultural watersheds. **Water Resour. Bull.**, v. 11, n. 5, p.965-974, 1975.

APÊNDICES

Apêndice A – Dados pareados adicionados no programa HEC-HMS 4.0

Granulometria do material de leito das sub-bacias utilizadas no programa HEC-HMS 4.0

Sub-bacias	MD1*	MD2*	JG*	STP*
Diâmetro (mm)	% Passante	% Passante	% Passante	% Passante
0.001	0	0	0	0.5
0.01	0	0	—	0.5
0.062	—	—	2.32	—
0.1	10	0	—	15
0.125	—	—	10.79	—
0.2	50	—	—	—
0.25	—	—	48.47	—
0.45	88	10	—	—
0.5	90	16	80.07	—
0.55	—	—	—	50
1	—	35	88.54	65
1.5	—	—	—	70
3	—	—	—	80
5	—	—	—	90
10	—	45	—	—
15	—	50	—	—
30	—	58	—	—
40	—	65	—	—
47	—	76	—	—
50	—	84	—	—

Fonte: Extraído de Branco (1998); Paranhos (2003); Belló (2004).

*MD1 = Menino Deus 1

MD2 = Menino Deus 2

JG = João Goulart

STP = Sítio do Tio Pedro

Batimetria do reservatório no ano de 2001 conforme Dill (2002).

COTA (m)	VOLUME ACUMULADO (hm³)	VOLUME (m³)	VOLUME (1000m³)
118	0,00593153	5931,533	5,932
119	0,02652735	26527,353	26,527
120	0,06903199	69031,993	69,032
121	0,13667046	136670,463	136,670
122	0,22695709	226957,093	226,957
123	0,33727338	337273,383	337,273
124	0,48138233	481382,333	481,382
125	0,66653911	666539,113	666,539
126	0,89111039	891110,393	891,110
127	1,15915818	1159158,183	1159,158
128	1,47811828	1478118,283	1478,118
129	1,86290145	1862901,453	1862,901
130	2,32321170	2323211,703	2323,212
131	2,86494197	2864941,973	2864,942
132	3,47700000	3477000	3477,000

Fonte: Extraído de Marins (2004).

Apêndice B – Relatório das medições de vazões realizadas com os molinetes

Molinete Aott n3

Tempo 60 segundos

Equação para cálculo da velocidade

$V = 0,02 + 0,238N$ para $N \leq 0,67$

$V = 0,008 + 0,2558N$ para $N > 0,67$

Código: Laís 1

Nome: João Goulart

Rio: Vacacaí Mirim

Bacia: Pardo

Município: Santa Maria

Data: 11/02/14

Hora inicial: 09:20 Nivel da Régua 9 cm

Hora Final: 10:20 Nivel da Régua 9 cm

Hidrometrista: Laís, Larissa e Osmar

Método de cálculo da Meia Seção

Processo Simplificado

Ver	Dist (m)	Prof (cm)	80% Prof R	60% Prof V(m/s)	20% Prof R	vmedia V(m/s)	Vel (m/s)	Area (m ²)	Vazão (m ³ /s)
PI	0								
1	0	0				0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,5	9		26 0,123		0,123	0,123	0,045	0,006
3	1	12		24 0,115		0,115	0,115	0,060	0,007
4	1,5	15		70 0,306		0,306	0,306	0,075	0,023
5	2	18		8 0,052		0,052	0,052	0,090	0,005
6	2,5	11		26 0,123		0,123	0,123	0,066	0,008
7	3,2	0				0,000	0,000	0,000	0,000
PF	3,2					0,000			

Número de verticais 7

Largura do rio 3,20

Velocidade média 0,144

Área molhada 0,336

Vazão total 0,048

Profundidade média 0,105

Perímetro molhado 3,224

Raio Hidráulico 0,104

Molinete Aott n3

Tempo 60 segundos

Equação para cálculo da velocidade

$V = 0,02 + 0,238N$ para $N \leq 0,67$

$V = 0,008 + 0,2558N$ para $N > 0,67$

Codigo: Laís 1

Nome: João Goulart

Rio: Vacacaí Mirim

Bacia: Pardo

Município: Santa Maria

Data: 11/02/14

Hora inicial: 09:20 Nivel da Régua 9 cm

Hora Final : 10:20 Nivel da Régua 9 cm

Hidrometrista: Laís, Larissa e Osmar

Método de cálculo da Meia Seção

Processo Simplificado

Ver	Dist (m)	Prof (cm)	80% Prof R	60% Prof V(m/s)	20% Prof R	20% Prof V(m/s)	vmedia (m/s)	Vel (m/s)	Area (m ²)	Vazão (m ³ /s)
PI	0									
1	0	0					0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,5	9		23	0,111		0,111	0,111	0,045	0,005
3	1	12		21	0,103		0,103	0,103	0,060	0,006
4	1,5	15		85	0,370		0,370	0,370	0,075	0,028
5	2	18		9	0,056		0,056	0,056	0,090	0,005
6	2,5	11		24	0,115		0,115	0,115	0,066	0,008
7	3,2	0					0,000	0,000	0,000	0,000
PF	0						0,000			

Número de verticais 7

Largura do rio 3,20

Velocidade média 0,154

Área molhada 0,336

Vazão total 0,052

Profundidade média 0,105

Perímetro molhado 3,224

Raio Hidráulico 0,104

Molinete Aott n3

Tempo 60 segundos

equação para cálculo da velocidade

$V = 0,02 + 0,238N$ para $N \leq 0,67$

$V = 0,008 + 0,2558N$ para $N > 0,67$

Código: Laís 1

Nome: João Goulart

Rio: Vacacaí Mirim

Bacia: Pardo

Município: Santa Maria

Data: 19/03/14

Hora inicial: 10:20 Nivel da Régua 40 cm

Hora Final: 11:23 Nivel da Régua 40 cm

Hidrometrista: Laís, Larissa e Osmar

Método de cálculo da Meia Seção

Processo Simplificado

Ver	Dist (m)	Prof (cm)	80% Prof R	Prof V(m/s)	60% Prof R	Prof V(m/s)	20% Prof R	Prof V(m/s)	vmedia (m/s)	Vel (m/s)	Area (m ²)	Vazão (m ³ /s)
PI	0											
1	0	0							0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,6	42			211	0,908			0,908	0,908	0,231	0,210
3	1,1	45			258	1,108			1,108	1,108	0,225	0,249
4	1,6	47			218	0,937			0,937	0,937	0,235	0,220
5	2,1	51			159	0,686			0,686	0,686	0,255	0,175
6	2,6	48			108	0,468			0,468	0,468	0,240	0,112
7	3,1	40			0	0,020			0,020	0,020	0,200	0,004
8	3,6	0							0,000	0,000	0,000	0,000
PF	3,1								0,000			

Número de verticais 8

Largura do rio 3,60

Velocidade média 0,700

Área molhada 1,386

Vazão total 0,971

Profundidade média 0,385

Perímetro molhado 3,883

Raio Hidráulico 0,357

Molinete Molinete HC12800

Tempo 60 segundos

equação para cálculo da velocidade

$V = 0,016 + 0,246N$ para $N \leq 2,793$

$V = 0,011 + 0,25N$ para $N > 2,793$

Código: Laís 1

Nome: João Goulart

Rio: Vacacaí Mirim

Bacia: Pardo

Município: Santa Maria

Data: 31/03/14

Hora inicial: 15:32 Nivel da Régua 31,5 cm

Hora Final: 16:02 Nivel da Régua 31,4 cm

Hidrometrista: Laís e Osmar

Método de cálculo da Meia Seção

Processo Simplificado

Ver	Dist (m)	Prof (cm)	80% Prof R	60% Prof V(m/s)	20% Prof R	20% Prof V(m/s)	vmedia (m/s)	Vel (m/s)	Area (m ²)	Vazão (m ³ /s)
PI	0									
1	0	0					0,000	0,000	0,000	0,000
2	1	61,2		30 0,139			0,139	0,139	0,459	0,064
3	1,5	56,4		90 0,385			0,385	0,385	0,282	0,109
4	2	61,2		110 0,467			0,467	0,467	0,306	0,143
5	2,5	59		110 0,467			0,467	0,467	0,649	0,303
6	4,2	0					0,000	0,000	0,000	0,000
PF	0						0,000			

Número de verticais 6

Largura do rio 4,20

Velocidade média 0,365

Área molhada 1,696

Vazão total 0,618

Profundidade média 0,404

Perímetro molhado 4,477

Raio Hidráulico 0,379

Molinete Molinete HC12800

Tempo 60 segundos

Equação para cálculo da velocidade

$V = 0,016 + 0,246N$ para $N \leq 2,793$

$V = 0,011 + 0,25N$ para $N > 2,793$

Código: Laís 1

Nome: João Goulart

Rio: Vacacaí Mirim

Bacia: Pardo

Município: Santa Maria

Data: 05/05/14

Hora inicial: 11:00 Nivel da Régua 52,7 cm

Hora Final: 11:42 Nivel da Régua 52,1 cm

Hidrometrista: Laís e Osmar

Método de cálculo da Meia Seção

Processo Simplificado

Ver	Dist (m)	Prof (cm)	80% Prof R	60% Prof V(m/s)	20% Prof R	V(m/s)	vmedia (m/s)	Vel (m/s)	Area (m ²)	Vazão (m ³ /s)
PI	0									
1	0	0					0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,5	90		260	1,094		1,094	1,094	0,450	0,492
3	1	98		230	0,969		0,969	0,969	0,490	0,475
4	1,5	81		280	1,178		1,178	1,178	0,405	0,477
5	2	74		220	0,928		0,928	0,928	0,370	0,343
6	2,5	68		110	0,467		0,467	0,467	0,340	0,159
7	3	50		60	0,262		0,262	0,262	0,250	0,066
8	3,5	30		20	0,098		0,098	0,098	0,150	0,015
9	4	9		0	0,016		0,016	0,016	0,068	0,001
10	5	0					0,000	0,000	0,000	0,000
PF	0						0,000			

Número de verticais 10

Largura do rio 5,00

Velocidade média 0,804

Área molhada 2,522

Vazão total 2,028

Profundidade média 0,504

Perímetro molhado 5,689

Raio Hidráulico 0,443

Molinete Molinete HC12800

Tempo 60 segundos

Equação para cálculo da velocidade

$V = 0,016 + 0,246N$ para $N \leq 2,793$

$V = 0,011 + 0,25N$ para $N > 2,793$

Código: Laís 1

Nome: João Goulart

Rio: Vacacaí Mirim

Bacia: Pardo

Município: Santa Maria

Data: 12/05/14

Hora inicial: 09:46 Nivel da Régua: 16,9 cm

Hora Final: 10:46 Nivel da Régua: 16,9 cm

Hidrometrista: Laís, Alcides e Osmar

Método de cálculo da Meia Seção

Processo Simplificado

Ver	Dist (m)	Prof (cm)	80% Prof R	60% Prof V(m/s)	20% Prof R	20% Prof V(m/s)	vmedia (m/s)	Vel (m/s)	Area (m ²)	Vazão (m ³ /s)
PI	0									
1	0	0					0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,2	31		40 0,180			0,180	0,180	0,108	0,020
3	0,7	42		50 0,221			0,221	0,221	0,210	0,046
4	1,2	35		50 0,221			0,221	0,221	0,175	0,039
5	1,7	39		40 0,180			0,180	0,180	0,195	0,035
6	2,2	44		50 0,221			0,221	0,221	0,220	0,049
7	2,7	43		50 0,221			0,221	0,221	0,215	0,048
8	3,2	34		20 0,098			0,098	0,098	0,153	0,015
9	3,6	0					0,000	0,000	0,000	0,000
PF	3,6						0,000			

Número de verticais 9

Largura do rio 3,60

Velocidade média 0,197

Área molhada 1,277

Vazão total 0,251

Profundidade média 0,355

Perímetro molhado 3,923

Raio Hidráulico 0,325

Molinete Molinete HC12800

Tempo 60 segundos

Equação para cálculo da velocidade

$V = 0,016 + 0,246N$ para $N \leq 2,793$

$V = 0,011 + 0,25N$ para $N > 2,793$

Código: Laís 1

Nome: João Goulart

Rio: Vacacaí Mirim

Bacia: Pardo

Município: Santa Maria

Data: 13/06/14

Hora inicial: 10:39 Nivel da Régua 17,1 cm

Hora Final: 10:58 Nivel da Régua 16,2 cm

Hidrometrista: Laís, Marília e Alcides

Método de cálculo da Meia Seção

Processo Simplificado

Ver	Dist (m)	Prof (cm)	80% Prof R	Prof V(m/s)	60% Prof R	Prof V(m/s)	20% Prof R	Prof V(m/s)	vmedia (m/s)	Vel (m/s)	Area (m ²)	Vazão (m ³ /s)
PI	0											
1	0	0							0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,3	25			40	0,180			0,180	0,180	0,100	0,018
3	0,8	43			80	0,344			0,344	0,344	0,215	0,074
4	1,3	50			50	0,221			0,221	0,221	0,250	0,055
5	1,8	57			90	0,385			0,385	0,385	0,285	0,110
6	2,3	65			80	0,344			0,344	0,344	0,260	0,089
7	2,6	0							0,000	0,000	0,000	0,000
PF	2,6								0,000			

Número de verticais 7

Largura do rio 2,60

Velocidade média 0,312

Área molhada 1,110

Vazão total 0,346

Profundidade média 0,427

Perímetro molhado 3,154

Raio Hidráulico 0,352

Molinete Molinete HC12800

Tempo 60 segundos

Equação para cálculo da velocidade

$V = 0,016 + 0,246N$ para $N \leq 2,793$

$V = 0,011 + 0,25N$ para $N > 2,793$

Código: Laís 1

Nome: João Goulart

Rio: Vacacaí Mirim

Bacia: Pardo

Município: Santa Maria

Data: 17/07/14

Hora inicial: 11:10 Nivel da Régua 72 cm

Hora Final: 11:44 Nivel da Régua 58 cm

Hidrometrista: Laís, Alcides e Osmar

Método de cálculo da Meia Seção

Processo Simplificado

Ver	Dist (m)	Prof (cm)	80% Prof R	60% Prof V(m/s)	20% Prof R	20% Prof V(m/s)	vmedia (m/s)	Vel (m/s)	Area (m ²)	Vazão (m ³ /s)
PI	0									
1	0	0					0,000	0,000	0,000	0,000
2	1,5	95		220 0,928			0,928	0,928	0,950	0,881
3	2	80		160 0,672			0,672	0,672	0,400	0,269
4	2,5	120		270 1,136			1,136	1,136	0,600	0,682
5	3	140		400 1,678			1,678	1,678	0,700	1,174
6	3,5	140		340 1,428			1,428	1,428	0,700	0,999
7	4	140		240 1,011			1,011	1,011	0,700	0,708
8	4,5	130		110 0,467			0,467	0,467	0,650	0,304
9	5	100		30 0,139			0,139	0,139	0,500	0,070
10	5,5	180		40 0,180			0,180	0,180	0,675	0,121
11	5,75	0					0,000	0,000	0,000	0,000
PF	5,75						0,000			

Número de verticais 11

Largura do rio 5,75

Velocidade média 0,886

Área molhada 5,875

Vazão total 5,208

Profundidade média 1,022

Perímetro molhado 8,330

Raio Hidráulico 0,705

Molinete Molinete HC12800

Tempo 60 segundos

Equação para cálculo da velocidade

$V = 0,016 + 0,246N$ para $N \leq 2,793$

$V = 0,011 + 0,25N$ para $N > 2,793$

Código: Laís 1

Nome: João Goulart

Rio: Vacacaí Mirim

Bacia: Pardo

Município: Santa Maria

Data: 02/09/14

Hora inicial: 11:16 Nivel da Régua 13,3 cm

Hora Final: 11:30 Nivel da Régua 46 cm

Hidrometrista: Laís, Alcides, Roberta, Glaucia, Larissa

Método de cálculo da Meia Seção

Processo Simplificado

Ver	Dist (m)	Prof (cm)	80% Prof R	60% Prof V(m/s)	40% Prof R	20% Prof V(m/s)	vmedia (m/s)	Vel (m/s)	Area (m ²)	Vazão (m ³ /s)
PI	0									
1	0	0					0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,2	66		80 0,344			0,344	0,344	0,165	0,057
3	0,5	80		180 0,761			0,761	0,761	0,240	0,183
4	0,8	78		310 1,303			1,303	1,303	0,234	0,305
5	1,1	74		300 1,261			1,261	1,261	0,222	0,280
6	1,4	72		270 1,136			1,136	1,136	0,216	0,245
7	1,7	0					0,000	0,000	0,000	0,000
PF	1,7						0,000			

Número de verticais 7

Largura do rio 1,70

Velocidade média 0,993

Área molhada 1,077

Vazão total 1,070

Profundidade média 0,634

Perímetro molhado 2,705

Raio Hidráulico 0,398

Molinete Molinete HC12800

Tempo 60 segundos

Equação para cálculo da velocidade

$V = 0,016 + 0,246N$ para $N \leq 2,793$

$V = 0,011 + 0,25N$ para $N > 2,793$

Código: Laís 1

Nome: João Goulart

Rio: Vacacaí Mirim

Bacia: Pardo

Município: Santa Maria

Data: 02/09/14

Hora inicial: 11:30 Nivel da Régua 46 cm

Hora Final: 12:03 Nivel da Régua 56 cm

Hidrometrista: Laís, Alcides, Roberta, Glaucia, Larissa

Método de cálculo da Meia Seção

Processo Simplificado

Ver	Dist (m)	Prof (cm)	80% Prof R	60% Prof V(m/s)	20% Prof R	20% Prof V(m/s)	vmedia (m/s)	Vel (m/s)	Area (m ²)	Vazão (m ³ /s)
PI	0									
1	0	0					0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,7	96		120 0,508			0,508	0,508	0,576	0,293
3	1,2	120		90 0,385			0,385	0,385	0,600	0,231
4	1,7	125		280 1,178			1,178	1,178	0,625	0,736
5	2,2	120		310 1,303			1,303	1,303	0,600	0,782
6	2,7	115		330 1,386			1,386	1,386	0,575	0,797
7	3,2	97		300 1,261			1,261	1,261	0,485	0,612
8	3,7	88		190 0,803			0,803	0,803	0,440	0,353
9	4,2	75		50 0,221			0,221	0,221	0,375	0,083
10	4,7	60		10 0,057			0,057	0,057	0,270	0,015
11	5,1	0					0,000	0,000	0,000	0,000
PF	5,1						0,000			

Número de verticais 11

Largura do rio 5,10

Velocidade média 0,858

Área molhada 4,546

Vazão total 3,901

Profundidade média 0,891

Perímetro molhado 6,049

Raio Hidráulico 0,751

Molinete Molinete HC12800

Tempo 60 segundos

Equação para cálculo da velocidade

$V = 0,016 + 0,246N$ para $N \leq 2,793$

$V = 0,011 + 0,25N$ para $N > 2,793$

Código: Laís 1

Nome: João Goulart

Rio: Vacacaí Mirim

Bacia: Pardo

Município: Santa Maria

Data: 02/09/14

Hora inicial: 12:03 Nivel da Régua 46 cm

Hora Final: 12:20 Nivel da Régua 52 cm

Hidrometrista: Laís, Alcides, Roberta, Glaucia, Larissa

Método de cálculo da Meia Seção

Processo Simplificado

Ver	Dist (m)	Prof (cm)	80% Prof R	60% Prof V(m/s)	20% Prof R	20% Prof V(m/s)	vmedia (m/s)	Vel (m/s)	Area (m ²)	Vazão (m ³ /s)
PI	0									
1	0	0					0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,4	65		30	0,139		0,139	0,139	0,455	0,063
3	1,4	70		220	0,928		0,928	0,928	0,700	0,649
4	2,4	90		240	1,011		1,011	1,011	0,900	0,910
5	3,4	110		300	1,261		1,261	1,261	1,100	1,387
6	4,4	110		310	1,303		1,303	1,303	1,100	1,433
7	5,4	110		60	0,262		0,262	0,262	1,100	0,288
8	6,4	0					0,000	0,000	0,000	0,000
PF	6,4						0,000			

Número de verticais 8

Largura do rio 6,40

Velocidade média 0,883

Área molhada 5,355

Vazão total 4,731

Profundidade média 0,837

Perímetro molhado 7,291

Raio Hidráulico 0,734

Molinete Molinete HC12800

Tempo 60 segundos

Equação para cálculo da velocidade

$V = 0,016 + 0,246N$ para $N \leq 2,793$

$V = 0,011 + 0,25N$ para $N > 2,793$

Código: Laís 1

Nome: João Goulart

Rio: Vacacaí Mirim

Bacia: Pardo

Município: Santa Maria

Data: 06/10/14

Hora inicial: 10:15 Nivel da Régua 38 cm

Hora Final: 10:50 Nivel da Régua 48 cm

Hidrometrista: Laís, Roberta e Alcides

Método de cálculo da Meia Seção

Processo Simplificado

Ver	Dist (m)	Prof (cm)	80% Prof R	60% Prof V(m/s)	40% Prof R	20% Prof V(m/s)	vmedia (m/s)	Vel (m/s)	Area (m ²)	Vazão (m ³ /s)
PI	0									
1	0	0					0,000	0,000	0,000	0,000
2	2,3	50		40	0,180		0,180	0,180	0,700	0,126
3	2,8	65		150	0,631		0,631	0,631	0,325	0,205
4	3,3	70		270	1,136		1,136	1,136	0,350	0,398
5	3,8	80		220	0,928		0,928	0,928	0,400	0,371
6	4,3	94		250	1,053		1,053	1,053	0,470	0,495
7	4,8	103		290	1,219		1,219	1,219	0,515	0,628
8	5,3	107		280	1,178		1,178	1,178	0,535	0,630
9	5,8	84		330	1,386		1,386	1,386	0,420	0,582
10	6,3	110		110	0,467		0,467	0,467	0,550	0,257
11	6,8	87		20	0,098		0,098	0,098	0,435	0,043
12	7,3	72		30	0,139		0,139	0,139	0,360	0,050
13	7,8	0					0,000	0,000	0,000	0,000
PF	7,8						0,000			

Número de verticais 13

Largura do rio 7,80

Velocidade média 0,748

Área molhada 5,060

Vazão total 3,784

Profundidade média 0,649

Perímetro molhado 8,480

Raio Hidráulico 0,597

Molinete Molinete HC12800

Tempo 60 segundos

Equação para cálculo da velocidade

$V = 0,016 + 0,246N$ para $N \leq 2,793$

$V = 0,011 + 0,25N$ para $N > 2,793$

Código: Laís 1

Nome: João Goulart

Rio: Vacacaí Mirim

Bacia: Pardo

Município: Santa Maria

Data: 06/10/14

Hora inicial: 10:55 Nivel da Régua 48 cm

Hora Final: 11:26 Nivel da Régua 48 cm

Hidrometrista: Laís, Roberta e Alcides

Método de cálculo da Meia Seção

Processo Simplificado

Ver	Dist (m)	Prof (cm)	80% Prof R	60% Prof V(m/s)	20% Prof R	20% Prof V(m/s)	vmedia (m/s)	Vel (m/s)	Area (m ²)	Vazão (m ³ /s)
PI	0									
1	0	0					0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,6	105		10	0,057		0,057	0,057	0,578	0,033
3	1,1	125		140	0,590		0,590	0,590	0,625	0,369
4	1,6	110		310	1,303		1,303	1,303	0,550	0,716
5	2,1	110		240	1,011		1,011	1,011	0,550	0,556
6	2,6	97		300	1,261		1,261	1,261	0,485	0,612
7	3,1	85		230	0,969		0,969	0,969	0,425	0,412
8	3,6	75		260	1,094		1,094	1,094	0,375	0,410
9	4,1	65		100	0,426		0,426	0,426	0,325	0,138
10	4,6	60		10	0,057		0,057	0,057	0,750	0,043
11	6,6	0					0,000	0,000	0,000	0,000
PF	6,6						0,000	0,000	0,000	0,000

Número de verticais 11

Largura do rio 6,60

Velocidade média 0,705

Área molhada 4,662

Vazão total 3,289

Profundidade média 0,706

Perímetro molhado 7,411

Raio Hidráulico 0,629

Molinete Molinete HC12800

Tempo 60 segundos

Equação para cálculo da velocidade

$V = 0,016 + 0,246N$ para $N \leq 2,793$

$V = 0,011 + 0,25N$ para $N > 2,793$

Código: Laís 1

Nome: João Goulart

Rio: Vacacaí Mirim

Bacia: Pardo

Município: Santa Maria

Data: 17/10/14

Hora inicial: 09:10 Nivel da Régua 76 cm

Hora Final: 09:47 Nivel da Régua 90 cm

Hidrometrista: Laís, Roberta e Alcides

Método de cálculo da Meia Seção

Processo Simplificado

Ver	Dist (m)	Prof (cm)	80% Prof R	60% Prof V(m/s)	20% Prof R	20% Prof V(m/s)	vmedia (m/s)	Vel (m/s)	Area (m ²)	Vazão (m ³ /s)
PI	0									
1	0	0					0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,5	85		140	0,590		0,590	0,590	0,425	0,251
3	1	100		280	1,178		1,178	1,178	0,500	0,589
4	1,5	180		340	1,428		1,428	1,428	0,900	1,285
5	2	128		420	1,761		1,761	1,761	0,640	1,127
6	2,5	128		370	1,553		1,553	1,553	0,640	0,994
7	3	160		320	1,344		1,344	1,344	0,800	1,075
8	3,5	180		210	0,886		0,886	0,886	0,900	0,797
9	4	160		390	1,636		1,636	1,636	0,800	1,309
10	4,5	150		250	1,053		1,053	1,053	0,750	0,789
11	5	155		180	0,761		0,761	0,761	0,930	0,708
12	5,7	0					0,000	0,000	0,000	0,000
PF	5,7						0,000	0,000	0,000	0,000
PF	7,8						0,000			

Número de verticais 13

Largura do rio 5,70

Velocidade média 1,225

Área molhada 7,285

Vazão total 8,924

Profundidade média 1,278

Perímetro molhado 8,057

Raio Hidráulico 0,904

Molinete Molinete HC12800

Tempo 60 segundos

Equação para cálculo da velocidade

$V = 0,016 + 0,246N$ para $N \leq 2,793$

$V = 0,011 + 0,25N$ para $N > 2,793$

Código: Laís 1

Nome: João Goulart

Rio: Vacacaí Mirim

Bacia: Pardo

Município: Santa Maria

Data: 17/10/14

Hora inicial: 09:50 Nivel da Régua 88 cm

Hora Final : 10:16 Nivel da Régua 82 cm

Hidrometrista: Laís, Roberta e Alcides

Método de cálculo da Meia Seção

Processo Simplificado

Ver	Dist (m)	Prof (cm)	80% Prof R	60% Prof V(m/s)	20% Prof R	20% Prof V(m/s)	vmedia (m/s)	Vel (m/s)	Area (m ²)	Vazão (m ³ /s)
PI	0									
1	0	0					0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,7	130		130 0,549			0,549	0,549	0,780	0,428
3	1,2	130		110 0,467			0,467	0,467	0,650	0,304
4	1,7	150		70 0,303			0,303	0,303	0,750	0,227
5	2,2	150		360 1,511			1,511	1,511	0,750	1,133
6	2,7	150		360 1,511			1,511	1,511	0,750	1,133
7	3,2	135		370 1,553			1,553	1,553	0,675	1,048
8	3,7	120		390 1,636			1,636	1,636	0,600	0,982
9	4,2	115		380 1,594			1,594	1,594	0,575	0,917
10	4,7	120		330 1,386			1,386	1,386	0,600	0,832
11	5,2	90		270 1,136			1,136	1,136	0,428	0,486
12	5,65	0					0,000	0,000	0,000	0,000
PF	5,65						0,000	0,000	0,000	0,000
PF	7,8						0,000			

Número de verticais 13

Largura do rio 5,65

Velocidade média 1,142

Área molhada 6,558

Vazão total 7,489

Profundidade média 1,161

Perímetro molhado 7,153

Raio Hidráulico 0,917

Molinete Molinete HC12800

Tempo 50 segundos

Equação para cálculo da velocidade

$V = 0,016 + 0,246N$ para $N \leq 2,793$

$V = 0,011 + 0,25N$ para $N > 2,793$

Código: Laís 1

Nome: João Goulart

Rio: Vacacaí Mirim

Bacia: Pardo

Município: Santa Maria

Data: 30/10/14

Hora inicial: 09:27 Nivel da Régua 91 cm

Hora Final: 09:51 Nivel da Régua 94 cm

Hidrometrista: Laís, Alcides, Osmar e Felipe

Método de cálculo da Meia Seção

Processo Simplificado

Ver	Dist (m)	Prof (cm)	80% Prof R	60% Prof V(m/s)	20% Prof R	20% Prof V(m/s)	vmedia (m/s)	Vel (m/s)	Area (m ²)	Vazão (m ³ /s)
PI	0									
1	0	0					0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,5	70	100	0,508			0,508	0,508	0,350	0,178
3	1,0	90	190	0,961			0,961	0,961	0,450	0,432
4	1,5	96	260	1,311			1,311	1,311	0,480	0,629
5	2,0	108	370	1,861			1,861	1,861	0,540	1,005
6	2,5	114	420	2,111			2,111	2,111	0,570	1,203
7	3,0	114	420	2,111			2,111	2,111	0,570	1,203
8	3,5	126	430	2,161			2,161	2,161	0,630	1,361
9	4,0	139	470	2,361			2,361	2,361	0,695	1,641
10	4,5	139	310	1,561			1,561	1,561	0,695	1,085
11	5,0	134	290	1,461			1,461	1,461	0,670	0,979
12	5,5	160	200	1,011			1,011	1,011	0,800	0,809
13	6,0	150	180	0,911			0,911	0,911	0,750	0,683
14	6,5	0					0,000	0,000	0,000	0,000
PF	6,5						0,000			

Número de verticais 14

Largura do rio 6,50

Velocidade média 1,557

Área molhada 7,200

Vazão total 11,209

Profundidade média 1,108

Perímetro molhado 8,108

Raio Hidráulico 0,888

Molinete Aott n3

Tempo 60 segundos

Equação para cálculo da velocidade

$V = 0,02 + 0,238N$ para $N \leq 0,67$

$V = 0,008 + 0,2558N$ para $N > 0,67$

Código: Laís 1

Nome: João Goulart

Rio: Vacacaí Mirim

Bacia: Pardo

Município: Santa Maria

Data: 21/11/14

Hora inicial: 09:45 Nivel da Régua 3 cm

Hora Final: 10:15 Nivel da Régua 3 cm

Hidrometrista: Laís e Roberta

Método de cálculo da Meia Seção

Processo Simplificado

Ver	Dist (m)	Prof (cm)	80% Prof R	60% Prof V(m/s)	20% Prof R	20% Prof V(m/s)	vmedia (m/s)	Vel (m/s)	Area (m ²)	Vazão (m ³ /s)
PI	0									
1	0	0					0,000	0,000	0,000	0,000
2	2,10	18		23	0,111		0,111	0,111	0,202	0,023
3	2,25	15		25	0,119		0,119	0,119	0,022	0,003
4	2,40	17		26	0,123		0,123	0,123	0,025	0,003
5	2,55	15		53	0,234		0,234	0,234	0,023	0,005
6	2,70	17		53	0,234		0,234	0,234	0,026	0,006
7	2,85	10		27	0,127		0,127	0,127	0,015	0,002
8	3,0	10		6	0,044		0,044	0,044	0,070	0,003
9	4,25	0					0,000	0,000	0,000	0,000
PF	0						0,000			

Número de verticais 9

Largura do rio 4,25

Velocidade média 0,116

Área molhada 0,384

Vazão total 0,045

Profundidade média 0,090

Perímetro molhado 4,284

Raio Hidráulico 0,090

Apêndice C – Dados observados das concentrações de sedimentos em suspensão na Estação Fluviossedimentométrica João Goulart.

Tabela de coleta 1 das amostras de sedimentos em suspensão com o amostrador ISCO.

Data	HORA Coleta	Intervalo	Garrafa ISCO	Conc. Sed. Susp. (mg/L)	Cota (m)
17/07/2014	11:28	00:05:00	1	erro	0,628
17/07/2014	11:33	00:05:00	2	erro	0,621
17/07/2014	11:38	00:05:00	3	605,148	0,603
17/07/2014	11:43	00:05:00	4	623,953	0,585
17/07/2014	11:48	00:05:00	5	618,409	0,581
17/07/2014	11:53	00:05:00	6	491,575	0,579
17/07/2014	11:58	00:05:00	7	323,289	0,569
17/07/2014	12:03	00:05:00	8	312,937	0,573
17/07/2014	12:08	00:05:00	9	255,515	0,568
17/07/2014	12:13	00:05:00	10	198,238	0,568
17/07/2014	12:18	00:05:00	11	178,566	0,557
17/07/2014	12:23	00:05:00	12	150,911	0,555
17/07/2014	12:28	00:05:00	13	124,019	0,55
17/07/2014	12:33	00:05:00	14	104,536	0,552

Tabela de coleta 2 das amostras de sedimentos em suspensão com o amostrador ISCO.

Data	HORA Coleta	Intervalo	Garrafa ISCO	Conc. Sed. Susp. (mg/L)	Cota (m)
23/07/2014	11:37:00	00:03:00	1	46,368	0,905
23/07/2014	11:40	00:03:00	2	39,404	0,904
23/07/2014	11:43	00:03:00	3	59,956	0,899
23/07/2014	11:46	00:03:00	4	55,322	0,912
23/07/2014	11:49	00:03:00	5	68,845	0,92
23/07/2014	11:52	00:03:00	6	70,22	0,933
23/07/2014	11:55	00:03:00	7	97,108	0,937
23/07/2014	11:58	00:03:00	8	87,087	0,951
23/07/2014	12:01	00:03:00	9	66,43	0,964
23/07/2014	12:04	00:03:00	10	58,988	0,974
23/07/2014	12:07	00:03:00	11	124,375	0,996
23/07/2014	12:10	00:03:00	12	136,014	1,016
23/07/2014	12:13	00:03:00	13	159,821	1,024
23/07/2014	12:16	00:03:00	14	169,553	1,045
23/07/2014	12:19	00:03:00	15	198,982	1,063
23/07/2014	12:22	00:03:00	16	198,081	1,066
23/07/2014	12:25	00:03:00	17	169,18	1,069
23/07/2014	12:28	00:03:00	18	176,177	1,074
23/07/2014	12:31	00:03:00	19	124,625	1,074
23/07/2014	12:34	00:03:00	20	138,109	1,074
23/07/2014	12:37	00:03:00	21	136,865	1,074
23/07/2014	12:40	00:03:00	22	124,161	1,08
23/07/2014	12:43	00:03:00	23	120,351	1,077
23/07/2014	12:46	00:03:00	24	134,017	1,069

Tabela de coleta 3 das amostras de sedimentos em suspensão com o amostrador ISCO.

Data	HORA Coleta	Intervalo	Garrafa ISCO	Conc. Sed. Susp. (mg/L)	Cota (m)
02/09/2014	11:07	00:05:00	1	232,512	0,076
02/09/2014	11:12	00:05:00	2	134,51	0,111
02/09/2014	11:17	00:05:00	3	94,781	0,158
02/09/2014	11:22	00:05:00	4	127,557	0,221
02/09/2014	11:27	00:05:00	5	138,301	0,294
02/09/2014	11:32	00:05:00	6	205,243	0,42
02/09/2014	11:37	00:05:00	7	298,484	0,507
02/09/2014	11:42	00:05:00	8	380,411	0,558
02/09/2014	11:47	00:05:00	9	407,264	0,577
02/09/2014	11:52	00:05:00	10	416,627	0,573
02/09/2014	11:57	00:05:00	11	380	0,565
02/09/2014	12:02	00:05:00	12	322,757	0,546
02/09/2014	12:07	00:05:00	13	282,082	0,523
02/09/2014	12:12	00:05:00	14	259,54	0,501
02/09/2014	12:17	00:05:00	15	228,259	0,479
02/09/2014	12:22	00:05:00	16	192,865	0,463
02/09/2014	12:27	00:05:00	17	191,709	0,439
02/09/2014	12:32	00:05:00	18	183,007	0,419
02/09/2014	12:37	00:05:00	19	168,301	0,398
02/09/2014	12:42	00:05:00	20	150,064	0,378

Tabela de coleta 4 das amostras de sedimentos em suspensão com o amostrador ISCO.

Data	HORA Coleta	Intervalo	Garrafa ISCO	Conc. Sed. Susp. (mg/L)	Cota (m)
12/09/2014	08:49:00	00:05:00	1	221,145	1,15
12/09/2014	08:54:00	00:05:00	2	144,759	1,17
12/09/2014	08:59:00	00:05:00	3	169,237	1,149
12/09/2014	09:04:00	00:05:00	4	167,809	1,151
12/09/2014	09:09:00	00:05:00	5	165,099	1,137
12/09/2014	09:14:00	00:05:00	6	142,557	1,123
12/09/2014	09:19:00	00:05:00	7	129,085	1,12
12/09/2014	09:24:00	00:05:00	8	121,031	1,115
12/09/2014	09:29:00	00:05:00	9	109,407	1,102
12/09/2014	09:34:00	00:05:00	10	99,601	1,082
12/09/2014	09:39:00	00:05:00	11	92,289	1,077
12/09/2014	09:44:00	00:05:00	12	80,83	1,056
12/09/2014	09:49:00	00:05:00	13	76,917	1,043
12/09/2014	09:54:00	00:05:00	14	79,221	1,042
12/09/2014	09:59:00	00:05:00	15	81,184	1,027
12/09/2014	10:04:00	00:05:00	16	76,105	1,017
12/09/2014	10:09:00	00:05:00	17	68,038	1
12/09/2014	10:14:00	00:05:00	18	70,785	0,988
12/09/2014	10:19:00	00:05:00	19	63,691	0,966
12/09/2014	10:24:00	00:05:00	20	54,081	0,96
12/09/2014	10:29:00	00:05:00	21	48,811	0,952
12/09/2014	10:34:00	00:05:00	22	40,786	0,932
12/09/2014	10:39:00	00:05:00	23	48,256	0,934
12/09/2014	10:44:00	00:05:00	24	46,432	0,924

Tabela de coleta 5 das amostras de sedimentos em suspensão com o amostrador ISCO.

Data	HORA Coleta	Intervalo	Garrafa ISCO	Conc. Sed. Susp. (mg/L)	Cota (m)
30/09/2014	09:44	00:05:00	1	246,15	0,684
30/09/2014	09:49	00:05:00	2	228,982	0,675
30/09/2014	09:54	00:05:00	3	221,855	0,651
30/09/2014	09:59	00:05:00	4	222,011	0,631
30/09/2014	10:04	00:05:00	5	192,019	0,615
30/09/2014	10:09	00:05:00	6	175,756	0,61
30/09/2014	10:14	00:05:00	7	157,149	0,616
30/09/2014	10:19	00:05:00	8	150,643	0,626
30/09/2014	10:24	00:05:00	9	145,886	0,644
30/09/2014	10:29	00:05:00	10	165,077	0,657
30/09/2014	10:34	00:05:00	11	174,748	0,671
30/09/2014	10:39	00:05:00	12	196,485	0,681
30/09/2014	10:44	00:05:00	13	197,253	0,688
30/09/2014	10:49	00:05:00	14	216,485	0,714
30/09/2014	10:54	00:05:00	15	215,398	0,73
30/09/2014	10:59	00:05:00	16	209,603	0,745
30/09/2014	11:04	00:05:00	17	210,437	0,743
30/09/2014	11:09	00:05:00	18	187,704	0,75
30/09/2014	11:14	00:05:00	19	187,949	0,732
30/09/2014	11:19	00:05:00	20	164,64	0,715
30/09/2014	11:24	00:05:00	21	152,61	0,699
30/09/2014	11:29	00:05:00	22	136,262	0,685
30/09/2014	11:34	00:05:00	23	122,641	0,677
30/09/2014	11:39	00:05:00	24	109,717	0,654

Tabela de coleta 6 das amostras de sedimentos em suspensão com o amostrador ISCO.

Data	HORA Coleta	Intervalo	Garrafa ISCO	Conc. Sed. Susp. (mg/L)	Cota (m)
06/10/2014	10:06	00:03:00	1	75,299	0,404
06/10/2014	10:09	00:03:00	2	41,633	0,412
06/10/2014	10:12	00:03:00	3	38,406	0,423
06/10/2014	10:15	00:03:00	4	47,412	0,433
06/10/2014	10:18	00:03:00	5	49,538	0,446
06/10/2014	10:21	00:03:00	6	49,221	0,457
06/10/2014	10:24	00:03:00	7	53,743	0,464
06/10/2014	10:27	00:03:00	8	57,315	0,468
06/10/2014	10:30	00:03:00	9	60,153	0,468
06/10/2014	10:33	00:03:00	10	60,047	0,468
06/10/2014	10:36	00:03:00	11	58,309	0,467
06/10/2014	10:39	00:03:00	12	56,877	0,466
06/10/2014	10:42	00:03:00	13	58,646	0,465
06/10/2014	10:45	00:03:00	14	58,764	0,459
06/10/2014	10:48	00:03:00	15	61,668	0,457
06/10/2014	10:51	00:03:00	16	62,762	0,457
06/10/2014	10:54	00:03:00	17	57,477	0,46
06/10/2014	10:57	00:03:00	18	64,405	0,473
06/10/2014	11:00	00:03:00	19	71,801	0,488
06/10/2014	11:03	00:03:00	20	68,163	0,508
06/10/2014	11:06	00:03:00	21	70,2	0,52
06/10/2014	11:09	00:03:00	22	59,371	0,525
06/10/2014	11:12	00:03:00	23	62,534	0,524
06/10/2014	11:15	00:03:00	24	57,514	0,518

Tabela de coleta 7 das amostras de sedimentos em suspensão com o amostrador ISCO.

Data	HORA Coleta	Intervalo	Garrafa ISCO	Conc. Sed. Susp. (mg/L)	Cota (m)
17/10/2014	09:10	00:05:00	1	1104,013	0,76
17/10/2014	09:15	00:05:00	2	1060,978	0,851
17/10/2014	09:20	00:05:00	3	1024,894	0,924
17/10/2014	09:25	00:05:00	4	1005,238	0,975
17/10/2014	09:30	00:05:00	5	867,011	0,976
17/10/2014	09:35	00:05:00	6	791,073	0,965
17/10/2014	09:40	00:05:00	7	675,119	0,933
17/10/2014	09:45	00:05:00	8	607,655	0,907
17/10/2014	09:50	00:05:00	9	537,206	0,867
17/10/2014	09:55	00:05:00	10	492,909	0,842
17/10/2014	10:00	00:05:00	11	446,881	0,825
17/10/2014	10:05	00:05:00	12	374,767	0,819
17/10/2014	10:10	00:05:00	13	348,613	0,819
17/10/2014	10:15	00:05:00	14	314,9	0,818
17/10/2014	10:20	00:05:00	15	291,404	0,827
17/10/2014	10:25	00:05:00	16	255,804	0,834
17/10/2014	10:30	00:05:00	17	242,613	0,833
17/10/2014	10:35	00:05:00	18	209,1	0,834
17/10/2014	10:40	00:05:00	19	196,367	0,825
17/10/2014	10:45	00:05:00	20	193,523	0,824
17/10/2014	10:50	00:05:00	21	173,697	0,823
17/10/2014	10:55	00:05:00	22	167,23	0,814
17/10/2014	11:00	00:05:00	23	157,184	0,814
17/10/2014	11:05	00:05:00	24	141,559	0,809

Tabela de coleta 8 das amostras de sedimentos em suspensão com o amostrador ISCO.

Data	HORA Coleta	Intervalo	Garrafa ISCO	Conc. Sed. Susp. (mg/L)	Conc. Sed. Susp. / queima da M.O. (mg/L)	Cota (m)
30/10/2014	09:08	00:03:00	1	261,205	182,302	0,933
30/10/2014	09:11	00:03:00	2	185,028	137,468	0,932
30/10/2014	09:14	00:03:00	3	125,114	19,458	0,928
30/10/2014	09:17	00:03:00	4	160,423	142,178	0,932
30/10/2014	09:20	00:03:00	5	133,359	114,21	0,931
30/10/2014	09:23	00:03:00	6	164,332	147,531	0,933
30/10/2014	09:26	00:03:00	7	138,974	120,352	0,936
30/10/2014	09:29	00:03:00	8	139,671	122,527	0,937
30/10/2014	09:32	00:03:00	9	143,978	125,739	0,942
30/10/2014	09:35	00:03:00	10	141,252	120,406	0,948
30/10/2014	09:38	00:03:00	11	116,245	99,584	0,943
30/10/2014	09:41	00:03:00	12	132,32	117,426	0,948
30/10/2014	09:44	00:03:00	13	166,907	149,731	0,948
30/10/2014	09:47	00:03:00	14	152,973	136,399	0,948
30/10/2014	09:50	00:03:00	15	144,563	127,366	0,945
30/10/2014	09:53	00:03:00	16	90,878	54,771	0,944
30/10/2014	09:56	00:03:00	17	105,044	1,84	0,943
30/10/2014	09:59	00:03:00	18	7,53	1,923	0,938

Apêndice D – Parâmetros da MUSLE utilizado no modelo HEC-HMS 4.0

Tabela dos valores de cada parâmetro da MUSLE utilizado no modelo HEC-HMS 4.0.

Parâmetros Musle	Sub-Bacias			
	MD4*	MD2*	STP*	JG*
Erodibilidade (K)	0,118	0,0338	0,045	0,045
Topografico (LS)	0,7646	0,145	0,371	0,968
Cultivo e manejo do solo (C)	0,003	0,0166	0,021	0,021
Praticas conservacionistas (P)	1	0,2	0,2	0,2
Limite de vazão (m ³ /s)	0,3	0,3	0,3	0,3
Expoente	0,59	0,59	0,59	0,59

* MD4 - Sub-bacia Menino Deus 4

MD2 - Sub-bacia Menino Deus 2

STP - Sub-bacia Sítio do Tio Pedro

JG - Sub-bacia João Goulart

Fonte: BRANCO (1998); PARANHOS (2003), BELLÓ (2002)

ANEXO

Anexo A – Determinação dos parâmetros da MUSLE: K, Ls, C e P

CÁLCULO DO FATOR DE ERODIBILIDADE k

O fator de erodibilidade do solo k foi calculado pela equação de Wischimeier e Scmith, dada por:

$$k = [2,1 \cdot 10^{-4} \cdot M^{1,14} \cdot (12 - k_a) + 3,24 \cdot (k_b - 2) + 2,5 \cdot (k_c - 3) \cdot 0,001313]$$

Onde,

$M = (\% \text{silte} + \% \text{areia muito fina}) \cdot (100 - \% \text{argila})$,

$k_a =$ porcentagem de matéria orgânica,

$k_b =$ classe de permeabilidade.

CÁLCULO DO FATOR CONJUNTO COMPRIMENTO DE RAMPA E DECLIVIDADE – LS

O fator LS foi determinado pela equação de Williams e Berndt (1977), dada por:

$$LS = \left(\frac{L}{22,1} \right)^m \cdot (0,065 + 0,0454 \cdot S + 0,0065 \cdot S^2)$$

onde,

$m = 0,2$ para $S < 0,5$; $m = 0,3$ para $0,5 \leq S < 3,5$; $m = 0,5$ para $S \geq 3,5$,

S = declividade da rampa em %,

L = comprimento de rampa (m).

Para a determinação da declividade da rampa S utilizou-se o modelo digital do terreno. O valor do comprimento de rampa (L) foi calculado como sendo $\frac{1}{4}$ da largura do retângulo equivalente.

O comprimento equivalente é calculado pela equação abaixo:

$$L_{eq} = \left(\frac{k_c \sqrt{A}}{1,128} \right) \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{k_c} \right)^2} \right)$$

onde,

k_c = coeficiente de compacidade,

A = área da bacia hidrográfica (Km²).

Tabela de determinação do fator LS da MUSLE.

Sub-bacias	Área (Km ²)	Perímetro (Km)	S (%)	L (m)	m	LS
Menino Deus 4	18,79	19,8	22,64	660	0,5	24,2
Menino Deus 2	5,02	14,87	28,92	10	0,5	4,6
Sítio do Tio Pedro	0,53	2,75	26,8	86	0,5	11,7
João Goulart	5,78	9,62	26,8	585,3	0,5	30,6

Fonte: Do autor.

CÁLCULO DO FATOR DE CULTIVO E MANEJO DO SOLO - C

A estimativa do fator de cultivo e manejo de solo foi determinado através de observações sobre o tipo de cobertura vegetal existente sobre o solo da bacia ou sub-bacia, da área que cada tipo de cultura representa, utilizando-se as tabelas abaixo.

Tabela do Fator de uso e manejo do solo, C, para floresta.

Copas das árvores (% de área)	% área com manta morta de mais de 5 cm	Sob-coberto	C
100 – 75	100 – 90	Moderadamente pastado e queimado	0,001
		Intensamente pastado e queimado	0,003 a 0,011
70 – 40	80 – 75	Moderadamente pastado e queimado	0,002 a 0,004
		Intensamente pastado e queimado	0,01 a 0,04
35 – 20	70 – 40	Moderadamente pastado e queimado	0,003 a 0,009
		Intensamente pastado e queimado	0,02 a 0,09

Fonte: Lencastre e Franco (1984).

Tabela da Razão de perdas de solo entre área cultivada e área continuamente descoberta, C.

Cobertura, seqüência e manejo	Produtividade	C (%) no período de estágio da cultura				
		D	1	2	3	4
Milho, contínuo, palha queimada	Média	37	30	21	6	1
Milho, contínuo, palha enterrada	Média	23	19	17	4	2
Milho, contínuo, palha superfície	Média	-	5	2	1	1
Algodão, contínuo, convencional	Média	40	60	40	50	20
Soja, contínuo, convencional	Média	35	30	20	20	5
Pasto, 1º ano, rotação	-	-	-	40	-	-
Pasto, 2º ano, rotação	-	-	-	0,4	-	-
Milho, rotação após pasto	Média	10	11	8	4	1
Milho, rotação, plantio direto após pasto	Média	-	8	5	3	1
Soja, rotação após milho	Média	15	12	20	4	3
Soja, rotação, plantio direto após milho	Média	-	8	10	4	3
Algodão, rotação após soja	Média	20	20	30	15	13
Cana de açúcar, 1º ano, convencional	Média	-	-	15	-	-
Cana de açúcar, 2º ano	Média	-	-	0,15	-	-

Fonte: Bertoni e Lombardi Neto, 1985.

Tabela do Fator de uso e manejo do solo C, para pastagens.

Tipo de cobertura	A	C (*)	% do solo revestido					
			0	20	40	60	80	95-100
sem cobertura apreciável		E	0,45	0,20	0,10	0,042	0,013	0,003
		L	0,45	0,24	0,15	0,090	0,043	0,011
coberto de ervas altas ou mato rasteiro (média de 0,5 m)	25	E	0,36	0,17	0,09	0,038	0,012	0,003
		L	0,36	0,20	0,13	0,082	0,041	0,011
	50	E	0,26	0,13	0,07	0,035	0,012	0,003
		L	0,26	0,16	0,11	0,075	0,039	0,011
	75	E	0,17	0,10	0,06	0,031	0,011	0,003
		L	0,17	0,10	0,06	0,031	0,011	0,003
mato denso (média de 2 m)	25	E	0,40	0,18	0,09	0,040	0,013	0,003
		L	0,40	0,22	0,14	0,085	0,042	0,011
	50	E	0,34	0,16	0,085	0,038	0,012	0,003
		L	0,34	0,19	0,13	0,081	0,041	0,011
	75	E	0,28	0,14	0,08	0,036	0,012	0,003
		L	0,28	0,17	0,12	0,077	0,040	0,011
árvores com pouco mato rasteiro (média de 4 m)	25	E	0,42	0,19	0,10	0,041	0,013	0,003
		L	0,42	0,23	0,14	0,087	0,042	0,011
	50	E	0,39	0,18	0,09	0,040	0,013	0,003
		L	0,39	0,21	0,14	0,085	0,042	0,011
	75	E	0,36	0,17	0,09	0,039	0,012	0,003
		L	0,36	0,20	0,13	0,083	0,041	0,011

A = % de área coberta; C: Tipo de cobertura vegetal; E: revestimento de ervas ou manta morta com pelo menos 5 cm de espessura; L: revestimento de plantas herbáceas de folha larga.

Fonte: Lencastre e Franco (1984).

FATOR DE PRÁTICAS CONSERVACIONISTAS – P

O valor de P foi obtido em função das práticas conservacionistas utilizadas na bacia. Este fator representa a intensidade esperada de perdas de solo com utilização de determinada prática conservacionista e as perdas de solo quando a cultura está plantada no sentido do declive.

Seu valor pode ser estimado, conforme proposta de Bertoni & Lombardi Neto, em função da tabela abaixo.

Tabela dos valores das práticas conservacionista conforme Paranhos (2003).

Práticas conservacionistas	Valor de P
Plantio morro abaixo	1
Plantio em contorno	0,5
Alternâncias de capina + plantio em contorno	0,4
Cordões de vegetação permanente	0,2
Terraço	0,1