

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AMBIENTAL

Albert Teixeira Cardoso

**ESTUDO HIDROSEDIMENTOLÓGICO EM TRÊS BACIAS
EMBUTIDAS NO MUNICÍPIO DE RIO NEGRINHO - SC**

Florianópolis
2013

Albert Teixeira Cardoso

**ESTUDO HIDROSEDIMENTOLÓGICO EM TRÊS BACIAS
EMBUTIDAS NO MUNICÍPIO DE RIO NEGRINHO - SC**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia
Ambiental da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do Grau
de Mestre em Engenharia Ambiental.
Orientador: Prof. Dr. Masato Kobiyama

Florianópolis
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Cardoso, Albert Teixeira

Estudo hidrossedimentológico em três bacias embutidas no município de Rio Negrinho - SC / Albert Teixeira Cardoso ; orientador, Masato Kobiyama - Florianópolis, SC, 2013.
101 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Ambiental. 2. Hidrossedimentologia. 3. Turbidez. 4. Concentração de sedimentos em suspensão. 5. Produção de sedimentos em suspensão. I. Kobiyama, Masato. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

"Estudo Hidrossedimentológico em Três Bacias Embutidas no Município de Rio Negrinho - SC"

ALBERT TEIXEIRA CARDOSO

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

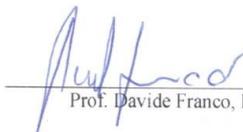
MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL

na Área de Engenharia Ambiental.

Aprovado por:



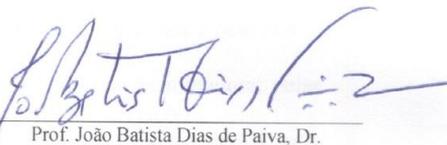
Prof. Masato Kobiyama, Dr.
(Orientador)



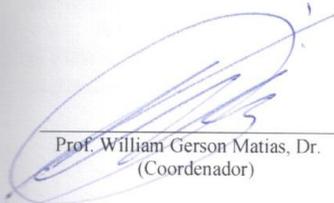
Prof. Davide Franco, Dr.



Prof.^a Nádia Bernardi Bonumá, Dr.^a



Prof. João Batista Dias de Paiva, Dr.



Prof. William Gerson Matias, Dr.
(Coordenador)



Prof. Pedro Luiz Borges Chaffé, Dr.

FLORIANÓPOLIS, SC – BRASIL
MARÇO/2013

AGRADECIMENTOS

Deixo aqui meus agradecimentos a todos aqueles que contribuíram, das mais diversas maneiras, para a construção desse trabalho.

A Deus, por estar comigo todos os dias.

Aos meus pais, Aderbal Cardoso e Creuza Teixeira Cardoso e ao meu irmão, André Teixeira Cardoso, pelo amor, carinho e apoio em todos os momentos.

À Maria Julia Elias, minha namorada e companheira, pela compreensão da minha ausência e também por todo amor, amizade e carinho que tem me oferecido.

Aos meus amigos Guilherme, Gustavo, Marlon e Rodrigo, pela amizade e pelos momentos agradáveis que sempre tenho ao lado de vocês.

Agradeço também a todos os meus amigos do LabHidro, pelos ensinamentos, discussões e pelos bons momentos que tivemos no laboratório e nos trabalhos em campo.

Meu agradecimento ao meu orientador, Prof. Masato Kobiyama, pela confiança e pelos conhecimentos passados a mim nesse período de aprendizagem.

Ao Prof. Pedro Luiz Borges Chaffe, pelos conselhos e pelo apoio, que foram fundamentais na construção desse trabalho.

Aos professores que fizeram parte da banca examinadora, pelas significativas contribuições que enriqueceram este trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, pela possibilidade da realização desse projeto e pelo apoio financeiro para a participação de evento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio por meio de bolsa de estudos, que possibilitou a execução e conclusão desse trabalho.

Meu muito obrigado a todos!

"Já deve estar chovendo na cabeceira da serra,
porque o ribeirão engrossa, cor de terra."

(João Guimarães Rosa, *Magma*, 1936)

RESUMO

Os processos de desagregação, transporte e deposição dos sedimentos são responsáveis por uma série de impactos ao ambiente. Esses processos são acentuados pela atividade humana. A maior parte do sedimento é transportada em suspensão nos rios, principalmente durante eventos de chuva. O objetivo deste estudo é analisar as relações entre chuva, vazão e sedimentos em suspensão na Bacia Hidrográfica do Rio dos Bugres (RB01 64,41 km²) e em duas bacias embutidas nesta (RB10 11,45 km² e RB11 6,95 km²). Como provável reservatório auxiliar do município, essa bacia foi decretada como área de proteção ambiental e, por esse fato, possui restrições no uso do solo. O monitoramento hidrossedimentológico foi realizado no exutório das bacias e conta com sensores de nível e de turbidez. As séries de turbidez e nível foram convertidas em vazão e concentração de sedimentos em suspensão (CSS) através da curva-chave de vazão e da relação entre turbidez e CSS. Verificou-se que os meses com maior produção de sedimentos em suspensão (PSS) foram junho e julho. Esses meses apresentaram maior vazão e precipitação. As séries monitoradas nas bacias foram separadas em eventos e, para cada evento, foram calculadas variáveis que pudessem ter relação com a PSS. As análises por meio do coeficiente de correlação de Pearson demonstraram que a vazão máxima (Q_{me}) foi a variável que apresentou correlação mais significativa com PSS. Com base nas análises de correlação foram selecionadas as variáveis Q_{me} e precipitação total do evento (P_{te}) para entrada nos modelos de regressão. Os modelos criados foram significativos e apresentaram coeficientes de determinação com valores entre 0,81 e 0,94. Comparando apenas as variáveis PSS e Q_{me} por evento, observou-se que, o coeficiente de regressão angular (β) aumentou da bacia menor (RB11) para a maior (RB01). Assim, uma mudança unitária na Q_{me} é mais significativa na bacia maior que nas bacias menores. Os coeficientes de determinação, R^2 ajustados, da relação PSS e Q_{me} foram 0,94, 0,89 e 0,80 para RB01, RB10 e RB11, respectivamente. Isso indica uma relação significativa existente entre essas variáveis, confirmando a Q_{me} como uma boa indicadora da PSS em pequenas bacias.

Palavras-chave: Turbidez; Concentração de Sedimentos em Suspensão; Produção de sedimentos em suspensão.

ABSTRACT

The processes of disaggregation, transport and deposition of sediments accounts for a number of environmental impacts, which are accentuated by the human activity. Most of this sediment is transported by suspension in the rivers, especially during rainfall events. The aim of this study is to assess the relationships among rainfall, discharge and suspended sediment in the Rio dos Bugres basin (RB01-64.41 km²) and two nested basins (RB10-11.45 km² e RB11-6.95 km²). This basin will be the next water source of the city, so it was declared as an environmental protection area and has restrictions on its land use. Discharge and sediment monitoring was performed at the outlet basin through the use of level and turbidity sensors. The relation between the values recorded by these sensors and the monitored values of discharge and suspended sediment concentration in the field was used to generate hydrographs and sedimentographs for the entire series. Months with the highest suspended sediment yield (*PSS*) were June and July, were also the months with the highest rainfall and discharge. The discharge and sediment series were separated in single events. Several parameters that could be related with *PSS* were determined for each event. Pearson's correlation analysis showed that the maximum discharge (*Qme*) was the variable with the most significant relationship with *PSS*. Based on Pearson's correlation analysis the variables *Qme* and total event precipitation (*Pte*) were selected to input in the regression model. The developed models were significant and presented coefficient of determination values ranged between 0.81 and 0.94. Comparing only the variables *PSS* and *Qme* it was found that the regression coefficient (β) increased from the smaller (RB11) to the largest basin (RB01). Thereby, a change in the *Qme* unit is more significant in the larger basin. The coefficients of determination, adjusted R², of the relation between *PSS* and *Qme* were 0.94, 0.89 and 0.80, to RB01, RB10 and RB11 basins, respectively. This suggests that a meaningful relationship exists between these variables, confirming *Qme* as a good indicator of the *PSS* in small basins.

Keywords: Turbidity; Suspended Sediment Concentration; Suspended Sediment Yield.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relações entre produção de sedimento e área baseado em trabalhos de alguns países (Adaptado de Owens & Slaymaker, 1992).....	38
Figura 2 – Relação entre turbidez e concentração de sedimentos em suspensão durante eventos de chuva. Cada símbolo representa um evento (Adaptado de Smith et al., 2003).....	41
Figura 3 – Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio dos Bugres e locais de monitoramento.....	42
Figura 4 – Mapa de Usos do solo e cobertura vegetal e mapa de declividade das bacias RB01, RB10 e RB11.....	45
Figura 5 – Histograma percentual de distribuição da declividade para as bacias RB01, RB10 e RB11.....	46
Figura 6 – Estações de monitoramento no exutório das bacias: a) e b) bacia RB01, monitoramento de precipitação, turbidez e nível; c) bacias RB10 e d) RB11, monitoramento de nível e turbidez.	48
Figura 7 – Sensor de turbidez modelo DST-12 equipado com dispositivo de limpeza do sensor óptico.....	50
Figura 8 – Coleta de amostras para análise de sedimentos em suspensão pelo método de Igual Incremento de Largura.	51
Figura 9 – Bancada para análise de sedimentos em suspensão pelo método de filtração a vácuo.....	52
Figura 10 – Exemplo de correção de inconsistência nos dados a) sedimentograma com inconsistência b) sedimentograma corrigido.....	53
Figura 11 – Exemplo de delimitação de eventos.	55
Figura 12 – Gráfico e equação das duas curvas de ajuste entre turbidez e CSS para a bacia RB01, a) primeira curva de ajuste, com apenas uma equação, b) segunda curva de ajuste, com duas equações.....	62
Figura 13 – Gráfico e equação da curva de ajuste entre turbidez e CSS para a bacia RB10.	63
Figura 14 - Gráfico e equação da curva de ajuste entre turbidez e CSS para a bacia RB11.	63
Figura 15 – Vazão e Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS) para toda a série monitorada da bacia RB01. CSS1 são os resultados de concentração de sedimento em suspensão gerados a partir da primeira curva de ajuste e CSS2 são os resultados gerados a partir da segunda curva de ajuste.	65

Figura 16 - Vazão e Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS) para toda a série monitorada da bacia RB10.	66
Figura 17 - Vazão e Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS) para toda a série monitorada da bacia RB11	67
Figura 18 – Precipitação, PSS e vazão média mensal para bacia RB01. PSS_1 representa a produção de sedimento para a primeira curva de ajuste e PSS_2 para segunda curva de ajuste.	69
Figura 19 - Estimativa mensal de precipitação e PSS e vazão média mensal para as bacias RB10 e RB11.	70
Figura 20 – Evento 1 da bacia RB01, vazão e concentração de sedimentos em suspensão.....	71
Figura 21 – Evento 8 da Bacia RB10, vazão e concentração de sedimentos em suspensão.....	72
Figura 22 – Evento 8 da Bacia RB11, vazão e concentração de sedimentos em suspensão.....	72
Figura 23 – Resultado das análises dos resíduos do modelo de regressão referentes à primeira curva de ajuste da bacia RB01. a) e b) são os gráficos dos resíduos com os valores de \ln_PSS_1 calculados e observados, c) plot normal dos resíduos e d) gráfico entre valores calculados e observados.	79
Figura 24 - Resultado das análises dos resíduos do modelo de regressão referentes à segunda curva de ajuste da bacia RB01. a) e b) são os gráficos dos resíduos com os valores de \ln_PSS_2 calculados e observados, c) plot normal dos resíduos e d) gráfico entre valores calculados e observados.	80
Figura 25 - Resultado das análises dos resíduos do modelo de regressão da bacia RB10. a) e b) são os gráficos dos resíduos com os valores de \ln_PSS calculados e observados, c) plot normal dos resíduos e d) gráfico entre valores calculados e observados.	82
Figura 26 - Resultado das análises dos resíduos do modelo de regressão da bacia RB11. a) e b) são os gráficos dos resíduos com os valores de \ln_PSS calculados e observados, c) plot normal dos resíduos e d) gráfico entre valores calculados e observados.	83
Figura 27 – Regressão entre Produção de Sedimento em Suspensão (PSS) e Vazão Máxima (Q_{me}) em eventos, para todas as bacias.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Percentuais de uso do solo para todas as bacias.	44
Tabela 2 – Tabela com informações de área e declividades para todas as bacias.	46
Tabela 3 – Pluviógrafos utilizados no método de Thiessen para cada bacia.....	49
Tabela 4 – Fatores de controle da <i>PSS</i> utilizados para modelo de regressão.	57
Tabela 5 – Características de chuva, vazão e sedimentos em suspensão para os eventos das bacias RB01, RB10 e RB11.	73
Tabela 6 –Resultado do coeficiente de correlação de Pearson entre a variável dependente (<i>ln PSS</i>) e as variáveis independentes.	77
Tabela 7 – Resultados do modelo de regressão para a primeira curva de ajuste da bacia RB01.....	79
Tabela 8 – Resultados do modelo de regressão para a segunda curva de ajuste da bacia RB01.	80
Tabela 9 - Resultados do modelo de regressão para bacia RB10.....	81
Tabela 10 - Resultados do modelo de regressão para RB11.	83
Tabela 11 – Resultados da regressão linear entre <i>PSS</i> e <i>Qme</i> para todas as bacias.	84

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
API_5	Índice de precipitação antecedente 5 dias	mm
API_3	Índice de precipitação antecedente 3 dias	mm
$CSSm$	Concentração máxima de Sedimentos em Suspensão	$mg.L^{-1}$
IP	Intensidade da Precipitação	mm
IP_{10}	Intensidade da Precipitação de 10 minutos	mm
m_1	Massa inicial do filtro	g
m_2	Massa do filtro mais massa do sedimento retido por ele	g
P	Precipitação	mm
PSS	Produção de sedimentos em suspensão específica	$kg.km^{-2}$
PSS_t	Produção de sedimento em suspensão total	kg
Pte	Precipitação total do evento.	mm
Qi	Vazão inicial	$m^3.s^{-1}$
$Qmax$	Vazão máxima do evento	$m^3.s^{-1}$
Qa	Vazão antecedente	$m^3.s^{-1}$
Qa_1	Vazão antecedente de 1 dia	$m^3.s^{-1}$
Qme	Vazão máxima específica	$mm.dia^{-1}$
$Qmed$	Vazão média	$m^3.s^{-1}$
t	Tempo de duração do evento	h
tP	Tempo de precipitação	h
t_{pico}	Tempo de pico	h
TiQ	Taxa de Incremento de Vazão	$m^3.s^{-1}.h^{-1}$
V	Volume	L

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	23
1.1 OBJETIVOS.....	25
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	25
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1 PROCESSOS EROSIVOS.....	26
2.2 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO.....	27
2.2.1 <i>Curva-chave de sedimentos</i>	28
2.2.2 <i>Métodos alternativos para monitoramento de sedimentos em suspensão</i>	29
2.3 FATORES DE CONTROLE DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO.....	31
2.3.1 <i>Precipitação</i>	32
2.3.2 <i>Uso do solo e declividade do terreno</i>	33
2.3.3 <i>Condições antecedentes</i>	34
2.3.4 <i>Vazão</i>	35
2.4 INFLUÊNCIA DA ESCALA ESPAÇO-TEMPORAL NA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS.....	36
2.4.1 <i>Escala espacial</i>	37
2.4.2 <i>Escala temporal</i>	39
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	42
3.1.1 <i>Localização</i>	42
3.1.2 <i>Geologia</i>	43
3.1.3 <i>Pedologia</i>	43
3.1.4 <i>Clima</i>	43
3.1.5 <i>Uso e cobertura vegetal</i>	43
3.1.6 <i>Declividade</i>	44
3.2 MONITORAMENTO.....	47
3.2.1 <i>Vazão</i>	47
3.2.2 <i>Precipitação</i>	49
3.2.3 <i>Sedimentos em suspensão</i>	50
3.2.4 <i>Consistência dos dados</i>	53
3.3 FATORES DE CONTROLE DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO EM EVENTOS.....	53
3.3.1 <i>Identificação e delimitação de eventos</i>	53
3.3.2 <i>Descrição dos fatores selecionados</i>	55

3.4 TRATAMENTO ESTATÍSTICO E ANÁLISE DE REGRESSÃO ...	58
3.4.1 <i>Transformação das variáveis</i>	58
3.4.2 <i>Tabelas de correlação</i>	58
3.4.3 <i>Análise de regressão multivariada</i>	59
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1 MONITORAMENTO	61
4.1.1 <i>Relações entre concentração de sedimentos em suspensão e turbidez</i>	61
4.1.2 <i>Sedimentograma e hidrograma</i>	64
4.2 ESTIMATIVA DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO	68
4.3 FATORES DE CONTROLE DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO	70
4.3.1 <i>Identificação e delimitação de eventos</i>	70
4.3.2 <i>Características de chuva, vazão e concentração de sedimentos em suspensão</i>	71
4.4 CORRELAÇÕES E MODELO DE REGRESSÃO	76
4.4.1 <i>Correlações</i>	76
4.4.2 <i>Regressão multivariada</i>	78
4.4.3 <i>Relação entre Produção de Sedimentos em Suspensão e Vazão Máxima</i>	84
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	86
REFERÊNCIAS	89
APÊNDICE A – CURVA DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE NÍVEL	97
APÊNDICE B – TABELAS DE CORRELAÇÃO.....	98

1 INTRODUÇÃO

O processo de desagregação e remoção das partículas do solo, denominado erosão, é responsável por uma série de impactos ao ambiente. Além da degradação do solo, o processo erosivo também governa os impactos destes sedimentos nos recursos hídricos (WALLING, 1988). O assoreamento em certos locais pode causar enchentes, problemas para a navegação e na vida útil de barragens (CHETTRI & BOWONDER, 1983; SCAPIN et al., 2007). Além disto, o próprio sedimento gera implicações ambientais quando em excesso, como a diminuição da fotossíntese em plantas aquáticas e a diminuição da qualidade da água. Outros problemas estão relacionados à capacidade que o sedimento possui de carregar agentes químicos ou patógenos (WALLING, 1988). Apesar de acontecer também de forma natural, os problemas relacionados à produção de sedimentos estão diretamente ligados a presença humana (DUNNE, 1979). Assim, a produção de sedimento pode ser utilizada como um indicador dos impactos do homem nos recursos hídricos.

No Brasil os estudos e a disponibilidade de dados sobre sedimentos ainda são poucos (PARANHOS & PAIVA, 2005). O estudo deste tema demanda investimento financeiro e de tempo; financeiro, pois requer a utilização de equipamentos e mão de obra qualificada; e tempo, pois é necessária a aquisição de dados com séries temporais confiáveis.

A Bacia Hidrográfica do Rio dos Bugres (BHRB), área de estudo deste trabalho, está localizada no município de Rio Negrinho. O Laboratório de Hidrologia (LabHidro), da Universidade Federal de Santa Catarina, vem desenvolvendo diversas pesquisas nessa região (GRANDO et al., 2008; KOBIYAMA et al., 2010; GIGLIO & KOBIYAMA, 2011; CARDOSO et al., 2012). Sendo, inclusive, algumas pesquisas na área de sedimentos (LOPES, 2008; LINO, 2009; MALUTTA, 2012).

Dentro do município a BHRB possui considerável importância no contexto social, pois é tida como futura fonte de água do município. Para assegurar a preservação dessa área com vistas ao uso futuro, a prefeitura municipal de Rio Negrinho criou a Área de Proteção Ambiental (APA) do Rio dos Bugres. Como os atuais usos do solo da BHRB podem influenciar nos processos erosivos e, conseqüentemente, na quantidade de sedimentos que é gerada, a realização do monitoramento e de estudos dos processos hidrossedimentológicos

podem ajudar na compreensão de tais processos, auxiliando no gerenciamento da APA.

O presente trabalho busca colaborar com a compreensão dos processos hidrossedimentológicos da BHRB através da análise de algumas questões:

➤ O sensor de turbidez, ou turbidímetro, é um equipamento amplamente utilizado no monitoramento de sedimentos em suspensão devido a sua capacidade de realizar amostragens com alta frequência temporal (NAVRATIL et al., 2011). Usualmente, a calibração do sensor ocorre através da relação deste com a concentração média de sedimentos em suspensão (CSS) na seção monitorada do rio. Dependendo das propriedades físicas do sedimento encontrado, essa relação pode apresentar diferentes tipos de comportamentos (ZABALETA et al., 2007). Dessa forma, qual seria a relação da turbidez com a CSS na BHRB e nas duas bacias embutidas?

➤ Outra questão abordada nesse estudo é referente à produção de sedimentos em suspensão (PSS) da bacia, que pode ser influenciada por vários fatores como: uso do solo, estações do ano, intensidade e distribuição da chuva, umidade antecedente do solo, tamanho da bacia, etc (WILLIAMS, 1989; De BOER & CAMPBELL, 1989; ZABALETA et al., 2007; CARVALHO, 1994; MINELLA et al., 2011). Como as bacias hidrográficas apresentam características diferentes, a influência desses fatores na PSS é também é diferente entre bacias. Assim, para a BHRB e bacias embutidas analisadas nesse estudo, quais os fatores possuem maior influência na PSS?

➤ A última questão analisada nesse estudo é relacionada à influência da escala na PSS. Os estudos de PSS são realizados em vários tipos de escalas, tanto temporais como espaciais. A integração de escalas é um dos grandes desafios na hidrologia (JIONGXIN & YUNXIA, 2005). Apesar dessa importância, a integração de escalas espaciais e temporais é, muitas vezes, ignorada. Esse estudo buscou compreender como a PSS varia com a área da bacia e também em escalas mensais e de eventos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar as relações entre chuva, vazão e sedimentos em suspensão na Bacia Hidrográfica do Rio dos Bugres.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a relação entre turbidez e a concentração de sedimentos em suspensão no exutório das bacias;
- Comparar a produção de sedimentos em suspensão em escala mensal e de evento entre as bacias de estudo, investigando o efeito de escala.
- Determinar os fatores com maior influência na produção de sedimentos em suspensão por evento.
- Identificar um modelo estatístico da produção de sedimentos em suspensão a partir de dados de vazão e precipitação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSOS EROSIVOS

A erosão hídrica é a principal responsável pela desagregação e pelo transporte de sedimentos oriundos do solo da bacia (GUY, 1970). Após um evento de chuva, as partículas erodidas das vertentes, adentram nos cursos de água onde, juntamente com os sedimentos providos da erosão das margens e do leito, são transportadas pelo rio para o exutório da bacia. O processo erosivo irá depender de características do solo, vegetação da bacia, chuva, declividade da bacia, escoamento superficial, entre outros (HSU et al., 2011). A maior parte do transporte de sedimento ocorre durante o período chuvoso, principalmente durante eventos de precipitação de média e grande intensidade (WOLMAN & MILLER, 1961).

Normalmente os sedimentos fluviais são classificados em relação à forma como são transportados. Nos cursos d'água, os sedimentos que apresentam características granulométricas e densidade diferentes, são transportados conforme as condições locais e do escoamento, sendo divididos em dois grupos principais: sedimento de leito (ou de arraste) e em suspensão.

A carga de leito, de maneira geral, possui granulometria maior e move-se no fundo do corpo d'água de três formas: saltação, rolamento ou através do deslizamento. O transporte irá depender das características do sedimento e das forças que irão atuar neles. Por possuir granulometria e densidade maior, a velocidade de deslocamento da carga de leito é muito menor que a velocidade média do fluxo na seção considerada (CRISTOFOLETTI, 1981).

O transporte em suspensão é responsável pelo movimento de partículas de granulometrias menores comparadas com as da carga de leito. Na maioria dos rios o transporte de sedimento por suspensão representa a maior parte da carga de sedimento transportada, variando entre 90 a 95% da carga total (SYVITSKI et al., 2003; WALLING & FANG, 2003). O transporte de sedimento de leito corresponde a uma pequena fração deste total (WALLING & WEBB, 1986).

Apesar de a carga em suspensão apresentar geralmente granulometria menor do que a de leito, não é apenas a sua granulometria que define o tipo de transporte. Um sedimento de mesmo tamanho pode estar ora suspenso ora sedimentado no leito do rio (CRISTOFOLETTI, 1981). Assim, para determinação do tipo de carga, também é necessário

observar o mecanismo de transporte. As partículas são mantidas em suspensão pelo fluxo turbulento e assim que este fluxo atinge certo limite, as partículas que estão em suspensão começam a precipitar (CRISTOFOLETTI, 1981).

A carga de sedimento em suspensão vem sendo estudada por diversos autores por sua importância tanto econômica, devido à perda de fertilidade dos solos e aumento do custo de tratamento da água para consumo, como ambiental, pois se sabe que este tipo de sedimento também pode ser responsável pelo transporte de contaminantes como pesticidas e metais pesados (MARTTILA & KLOVE, 2010; KATTAN, 1987; KAISER et al., 1990; GOSSIAUX, 1998). Além disso, o conhecimento da produção de sedimento da bacia é um importante fator que deve ser levado em consideração no dimensionamento e operação de obras hidráulicas nos cursos d'água (BELLINASO & PAIVA, 2007).

Devido ao fato de os custos com monitoramento serem elevados, existe uma falta de dados de sedimento no Brasil, especialmente em pequenas bacias hidrográficas (CHELLA et al., 2005; BELLINASO & PAIVA, 2007). Entretanto, é através do monitoramento que se torna possível à realização de estimativas mais precisa da produção de sedimento e também à melhor compreensão dos processos erosivos da bacia (SOLER et al., 2008). O monitoramento também é fundamental em ajustes de modelos, que são utilizados para estimar a produção de sedimentos (BELLINASO & PAIVA, 2007; GAO & JOSEFSON, 2012).

2.2 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO

A produção de sedimentos de uma bacia é resultante do processo de erosão, transporte, deposição e resuspensão dos sedimentos dessa bacia em um período de tempo. A produção de sedimentos inclui tanto os sedimentos transportados por suspensão quanto os sedimentos de leito.

A Produção de Sedimentos em Suspensão (*PSS*) inclui apenas os sedimentos transportados em suspensão e é calculada integrando o fluxo de sedimentos em suspensão no período de tempo:

$$PSS_{t_i, t_f} = \int_{t_i}^{t_f} Q(t) \cdot CSS(t) dt \quad (1)$$

onde PSS é a produção de sedimentos em suspensão [M], $Q(t)$ é a vazão [$L^3.T^{-1}$], CSS é a concentração de sólidos em suspensão [$M.L^{-1}$], t_i é o tempo inicial e t_f é o tempo final de integração. Dividindo-se a PSS pela área da bacia se tem a PSS específica.

O método tradicional de medição de CSS em rios ainda é o mais confiável, é realizado por meio da coleta de amostras em várias seções verticais do rio com equipamentos específicos para amostragem de sedimentos em suspensão. Entretanto, devido aos seus custos, outros métodos vêm sendo empregados para esta finalidade.

2.2.1 Curva-chave de sedimentos

A curva-chave de sedimentos é uma relação empírica entre CSS e vazão. Essa relação é normalmente definida como uma equação potencial (CRAWFORD, 1991; GAO & JOSEFSON, 2012):

$$CSS = aQ^b \quad (2)$$

onde CSS é a concentração de sedimentos em suspensão ($mg.L^{-1}$), Q é a vazão ($m^3.s^{-1}$), a e b são os coeficientes de regressão. Por meio do estabelecimento desta curva-chave de sedimento e com uma série contínua de dados de vazão, normalmente registros diários, a estimativa da PSS pode ser realizada através da soma dos valores de produção diários (GAO & JOSEFSON, 2012):

Trabalhos relatam a aplicação da curva-chave de sedimentos em bacias de vários tamanhos: Asselman (1999) aplicou este método na bacia do rio Reno o maior rio da Europa ocidental, com 165.000 km^2 ; Bronsdon & Naden (2000) estudaram bacias que variaram entre 1.110 à 4.390 km^2 ; Goodwin et al.(2003) aplicaram a relação em uma bacia de 58 km^2 . No Brasil o uso da curva-chave de sedimentos também é bastante comum, como exemplo os trabalhos de Chella et al.(2005), que estudaram o transporte de sedimentos no rio Barigüi (279 km^2) e Bellinaso & Paiva (2007) que realizaram o estudo em uma pequena bacia em fase de urbanização, com apenas 0,53 km^2 .

O problema no uso da curva-chave de sedimento é que se assume que a vazão é um bom parâmetro preditor da concentração de sedimentos em suspensão, e essa afirmação nem sempre é verdadeira. Além disto, também é assumido que o pico da CSS coincide com o pico da vazão (FINLAYSON, 1985).

Córdova & Gonzalez (1997) realizaram uma análise detalhada do método da curva-chave de sedimentos. Os autores avaliaram diferentes

fontes de erro que podem estar presentes neste método: erros relacionados à discretização e uso da curva de permanência de vazão, erros relacionados a extrapolação e erros relacionados a qualidade dos dados (CÓRDOVA & GONZALEZ, 1997).

Walling (1977) também analisou os erros na curva-chave tradicional de sedimentos. O autor comparou a estimativa obtida pela curva-chave com valores calculados a partir de registros contínuos de CSS. Foram criadas várias curvas-chave, que foram agrupadas de acordo com a sazonalidade e estágio da vazão (ascensão e recessão). O autor encontrou erros anuais acima de 280% e erros mensais variando entre +900% e -80%. O autor descreve que os erros envolvendo a curva-chave de sedimento dependem de vários fatores como natureza das bacias, intervalo de tempo em que a carga será calculada, procedimento utilizado na derivação da curva e a aplicação da curva de calibração.

Conforme Córdova & Gonzalez (1997) o uso da curva-chave de sedimento é mais adequado para bacias maiores, onde a diferença entre vazões médias, máximas e mínimas diárias não são muito significativas. Em bacias menores o uso da curva-chave de sedimentos não é muito apropriado, pois pode levar a interpretações errôneas, geradas pela falta de linearidade e alta dispersão da relação entre vazão e CSS (BELLINASSO & PAIVA, 2007; DUVERT et al., 2012).

Para a obtenção de dados confiáveis em pequenas bacias hidrográficas Córdova & Gonzalez (1997) argumentam que é importante à medição constante de vazão e CSS, derivando a curva-chave de sedimento tradicional para uma ampla variação de vazão, incorporando esta informação para intervalos de tempo em função do tempo de resposta da bacia. Outra forma para a aquisição de dados confiáveis em pequenas bacias é utilizar equipamentos alternativos que permitam a realização dessas medições continuamente, como sensores de turbidez.

2.2.2 Métodos alternativos para monitoramento de sedimentos em suspensão

O monitoramento frequente da CSS em cursos d'água requer investimento de tempo e dinheiro. Gray & Gartner (2009) descreveram tecnologias substitutivas para a medição de CSS, dentre elas: sensor de turbidez, equipamentos a laser, diferença de pressão e acústico *backscatter*. Cada tecnologia possui vantagens e desvantagens, que se ajustam melhor dependendo do objetivo de cada trabalho.

Conforme Navratil et al. (2011) a utilização de sensores de turbidez ainda é o método mais fácil e mais utilizado para o

monitoramento de sedimentos em suspensão com alta frequência de amostragem de dados. Este método é baseado no monitoramento quase contínuo da turbidez, sendo o sensor calibrado com amostras de sedimentos em suspensão coletadas durante vários eventos de chuva (FINLAYSON, 1985; NAVRATIL et al., 2011).

A turbidez é causada pela presença de material em suspensão ou dissolvido em uma solução. Quando a luz passa por esse material ela é refletida ou dispersada. Assim, a turbidez pode ser relacionada com a CSS apenas de forma indireta (MINELLA et al., 2009).

A relação entre CSS e turbidez pode ser linear ou não linear (LEWIS, 1996; SUN et al., 2001; OLD et al., 2003; GAO, 2008). Se as propriedades físicas das partículas em suspensão permanecerem constantes, então a relação tende a ser linear. Entretanto raramente tais propriedades permanecem constantes, e isto pode ter diferentes efeitos na relação CSS e turbidez. Caso o tamanho do sedimento aumente com o aumento da vazão uma relação curvilínea entre turbidez e CSS é esperada. Entretanto esta não linearidade não deve ser um problema no uso do sensor de turbidez, na maioria dos locais é possível encontrar uma boa correlação entre turbidez e CSS (ZABALETA et al., 2007).

Além da calibração do sensor através de amostras coletadas em campo, também é possível estabelecer esta correlação através da coleta de solo da bacia e da criação de amostras com concentrações pré-determinadas em laboratório. Este método de calibração possui a vantagem de não precisar estar em campo durante eventos de chuva para coletar amostras. Entretanto o erro associado a esse procedimento pode ser bem maior comparado ao método que utiliza amostras coletadas durante eventos. Minella et al. (2009) comparou o método de calibração através da relação entre turbidez e amostras de CSS coletadas durante inundações com a calibração da sonda com o uso de solos recolhidos na bacia. Os autores encontraram erros superiores a 600 mg.L^{-1} na estimativa da CSS utilizando método de laboratório com solo da bacia comparado com erros de 122 mg.L^{-1} do método que utiliza amostras de campo.

Navratil et al. (2011) enumeram 9 fontes de incertezas no uso do sensor de turbidez, 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, calibração do turbidímetro e estimativa da vazão. Os autores realizaram testes de Monte Carlo para obter resultados sobre a propagação dos erros relacionados a essas incertezas. Os resultados apresentaram erros

médios para amostras individuais de 10%, podendo alcançar 70% para concentrações maiores.

Finlayson (1985) e Minella et al. (2009) também analisaram alguns problemas no uso do sensor de turbidez para estimar a concentração de sedimentos em suspensão: o primeiro é o uso limitado do equipamento em apenas um ponto da seção do rio, reduzindo a estimativa da variação da concentração espacial do sedimento na seção; o segundo é o acúmulo de incrustações na lente do sensor, atrapalhando seu desempenho; o terceiro é a interferência das características dos sedimentos na leitura do turbidímetro. O primeiro problema pode ser solucionado através de correlações do resultado da leitura do turbidímetro com amostras coletadas em diferentes locais da seção transversal de monitoramento, através de métodos de integração, que representem a concentração em toda a seção. O segundo problema é resolvido através da limpeza constante da lente do equipamento ou através da compra de equipamentos com dispositivo de limpeza automático. O último caso é amenizado utilizando como solução para calibrar a sonda as amostras coletadas do próprio rio, não utilizando amostras de solo da bacia para calibrar o sensor (SUN et al., 2001; MINELLA et al., 2009).

2.3 FATORES DE CONTROLE DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO

O conhecimento dos fatores que controlam a produção de sedimento em uma bacia é útil para o desenvolvimento de modelos geoquímicos, de evolução de paisagem, em estudos de balanço de massa de sedimento e em estudos de estimativa de intensidade de erosão (RESTREPO et al., 2006). Além disto, o conhecimento de tais fatores é importante no gerenciamento de bacias hidrográficas, principalmente aquelas que possuem maior suscetibilidade a processos erosivos.

A produção de sedimentos em suspensão apresenta grande complexidade no tempo e varia para cada evento de chuva. Ela é influenciada por diversos fatores ambientais como: uso e manejo do solo, estações do ano, intensidade e distribuição da chuva, geomorfologia da bacia, umidade antecedente do solo, tamanho da bacia, quantidade e taxa de escoamento superficial, distância de transporte de sedimentos etc. (WILLIAMS, 1989; De BOER & CAMPBELL, 1989; ZABALETA et al., 2007; CARVALHO, 1994; MINELLA et al., 2011).

Seeger et al. (2004) tiveram como objetivo principal compreender os principais fatores que influenciam no transporte e na produção de sedimentos na bacia. Nesse trabalho os autores selecionaram parâmetros de precipitação do evento e precipitação antecedente ao evento, vazão do evento e vazão antecedente, vazão de pico, CSS e escoamento superficial. Duvert et al. (2012) também utilizaram 11 variáveis hidrometeorológicas para tentar prever a *PSS* em 8 bacias montanhosas pequenas. Assim como Seeger et al. (2004), Duvert et al. (2012) também utilizaram variáveis de vazão (do evento e anterior a esse), escoamento superficial, CSS e precipitação. Nu-Fang et al. (2011) investigaram as relações entre precipitação, vazão e transporte de sedimentos em uma bacia de 16,7 km² que desemboca na represa de Three-Gorges, na China. Restrepo et al. (2006) investigaram os fatores que controlam a produção de sedimentos na bacia do Rio Magdalena, sistema fluvial que drena a maior parte dos Andes Colombianos, esse rio é conhecido por sua alta *PSS*. Com o uso de um modelo de regressão múltipla os autores identificaram que o escoamento superficial e a vazão máxima conseguem explicar a maior parte da variação da produção de sedimento da bacia.

Quase todos os trabalhos com o objetivo de determinar os fatores que influenciam na produção de sedimentos (menos Restrepo et al. 2006) realizaram o estudo com base em eventos de chuva. Seeger et al. (2004) analisaram 19 eventos, Duvert et al. (2012) analisaram, para 8 bacias, um total de 572 eventos, Zabaleta et al. (2007) analisaram 119 eventos para 3 bacias e Nu-Fang et al. (2011) analisaram 40 eventos de chuva. Nestes trabalhos também foram aplicados modelos de regressão, para simular a produção de sedimentos. Duvert et al. (2012) justificam o uso de modelos de regressão, pois os modelos físicos requerem uma grande quantidade de dados de entrada e para validação, necessitando, também, da descrição dos processos de erosão e transporte.

2.3.1 Precipitação

O principal fator de controle de produção e transporte de sedimentos em suspensão em eventos de chuva é a precipitação (SEEGER et al., 2004; HSU et al., 2011). HSU et al. (2011) analisaram fatores característicos da chuva que pudessem ser utilizados como preditores do pico de CSS e da *PSS* em eventos de chuva. Como resultado o trabalho concluiu que a *PSS* teve uma alta correlação com a intensidade da precipitação e também com a declividade da bacia. Smith et al. (2003), também concluíram que, parte da variação da *PSS* por

evento, é devido a distribuição e intensidade da precipitação, além das condições de armazenamento de sedimento antecedente. Brasington & Richards (2000) estudaram a *PSS* e a relação entre *CSS* e vazão e concluíram que, para determinados eventos, esta relação era muito influenciada pela intensidade da precipitação. Isto porque os picos de chuva eram sempre coincidentes, em intensidade e duração, com os picos de *CSS*.

2.3.2 Uso do solo e declividade do terreno

O uso do solo e a declividade do terreno tem importante contribuição na produção de sedimentos da bacia. Para Zabaleta et al. (2007) a disponibilidade de sedimento é fortemente relacionada com o uso do solo na bacia. Em uma das bacias estudadas, os autores mostraram que a baixa disponibilidade de sedimento para transporte foi devido à presença de uma floresta nativa. Lefrançois et al. (2007) mostraram que a *CSS* no rio é influenciada pela disponibilidade de sedimento para transporte, o que pode variar conforme o uso do solo da bacia.

Lino (2009) utilizou o modelo SWAT para simular cinco cenários diferentes na bacia do Rio Preto (1.000,4 km²). Os cenários simulados foram: uso do solo e cobertura atual, mata nativa, agricultura, reflorestamento e uso e cobertura atual sem reservatórios. O autor concluiu que o cenário com predominância de uso agrícola foi o que apresentou maior produção de sedimento na bacia e o cenário com mata nativa apresentou o maior impacto na redução do escoamento superficial e da produção de sedimentos.

A importância das estradas como fonte de produção de sedimentos em suspensão foi analisada por Motha et al. (2001), que avaliaram 6 eventos e coletaram 43 amostras através do método de traçadores. Motha et al. (2001) concluíram que as estradas são as principais fontes de sedimentos em bacias florestais, e que estradas não pavimentadas podem ser a principal fonte de sedimentos nos rios durante evento de chuva extremos.

Grando (2011) explica que a preparação do solo, a manutenção e a construção de estradas são atividades que aumentam a produção de sedimentos em bacias hidrográficas florestais. Com relação à produção de sedimentos gerada pelas estradas, Griebeler (2002) comenta que as estradas modificam as características originais do terreno. Conforme o autor, a capacidade de infiltração do solo e o percurso do escoamento

superficial são alterados, podendo também ocorrer o acúmulo de águas adjacentes a estrada, funcionando como um canal de drenagem.

Kang et al. (2001) fizeram experimentos em plots com comprimentos entre 20 e 60 m, sob chuva natural, para avaliar os efeitos de vários tipos de uso do solo, declividade, precipitação e escoamento superficial sobre a produção de sedimentos em duas bacias agrícolas na China. Para isso os autores construíram os plots em diferentes declividades (0 a 36°). Os resultados demonstraram que a erosão na bacia ocorre principalmente nos temporais de verão. Os locais com solo exposto tiveram produção de sedimento significativamente maior do que nos locais com agricultura. A declividade do terreno teve um importante efeito na produção de sedimento, que foi maior em locais com uso agrícola do que em plots com floresta natural.

Liu et al.¹ (2007 *apud* HSU et al., 2011) realizaram trabalhos de campo e análises de escoamento superficial e erosão do solo em uma bacia montanhosa, coberta por pastagem natural. Os autores analisaram regiões com três declividades diferentes, 5°, 15° e 25°. Resultados demonstraram que, em comparação com o terreno com 5° de declividade, a quantidade de erosão do solo aumentou 23,2 e 78,9 vezes para os locais com declividade de 15° e 25°, respectivamente. A conclusão destes autores demonstra que o uso do solo, assim como a declividade, são fatores importantes que afetam a erosão e, conseqüentemente, a *PSS* da bacia.

2.3.3 Condições antecedentes

Seeger et al. (2004), Soler et al. (2007) e Zabaleta et al. (2007) demonstraram que as condições antecedentes de precipitação e umidade do solo na bacia apresentam uma importante relação com a produção de sedimentos. Estes fatores de precipitação e umidade antecedente se diferenciam de bacia para bacia, assim, também apresentam relações diferentes com a produção de sedimento para cada bacia.

Seeger et al. (2004) identificaram e classificaram relações diferentes entre vazão e CSS, um dos 3 fatores que possibilitaram diferenciá-los foi a precipitação antecedente. Em duas das três bacias

¹ LIU P. J.; MA W. G.; YANG J. H et al.. Study on water and soil erosion by different slope under four kinds of vegetation in the middle and south Shandong. Research of Soil and Water Conservation, V. 14, N. 6, p. 357–359, 2007.

estudadas por Zabaleta et al. (2007), foram encontradas correlações entre precipitação antecedente e sedimentos em suspensão. Soler et al.(2007) demonstraram que o escoamento superficial na bacia e, conseqüentemente, a CSS são fortemente dependentes da condição de umidade antecedente do solo.

Smith et al. (2003) examinaram a influência da deposição de sedimento no leito do rio, anterior ao evento, na *PSS* da bacia. Essa deposição antecedente de sedimento na bacia explicou parte das diferenças na forma e na magnitude do transporte de sedimento da bacia.

2.3.4 Vazão

Assim como a disponibilidade de sedimento, a capacidade de transporte é um fator importante na *PSS* de uma bacia. Este fator, relacionado à velocidade do fluxo, influencia diretamente na quantidade de sedimento que é transportada. Em vazões baixas normalmente são transportados os sedimentos mais finos, enquanto que em altas vazões, quando o rio atinge velocidades maiores, são transportados sedimentos mais grosseiros. Entretanto não existe uma sincronia entre vazão e transporte de sedimentos. Para uma mesma vazão a quantidade de sedimentos que é transportada pode variar. Esse atraso de um fenômeno físico em relação a outro é denominado histerese (WILLIAMS, 1989; SEEGER et al., 2004; ZABALETA et al., 2007; NADAL-ROMERO et al., 2008; MINELLA et al., 2011).

A vazão de pico ou vazão máxima durante um evento é um fator que pode ser utilizado na previsão de *PSS*. Woolhiser & Todorovic² (1974, *apud* DUVERT et al., 2012) estão entre os primeiros a mencionar a ocorrência desta relação. Outros autores também estudaram essa relação como Loughran et al. (1986), Rankl, (2004), Restrepo et al. (2006) e Duvert et al. (2010).

Duvert et al. (2012) explicaram 58% da variação da produção de sedimento na bacia do rio Magdalena apenas com o uso da vazão máxima e do escoamento superficial. Rankl (2004) obteve coeficientes de determinação entre *PSS* e vazão máxima que variaram entre 89% a 97% para 5 rios efêmeros em Wyoming, EUA.

² WOOLHISER, D.A., TODOROVIC, P. A stochastic model of sediment yield for ephemeral streams. In: Proceedings of the Symposium on Statistical Hydrology, Tucson, Arizona. USDA, V. 1275. p. 295–308, 1974.

O motivo desta alta correlação entre *PSS* e vazão de pico ainda não é claro. Rankl (2004) comenta que a alta variabilidade na *PSS* é resultante da alta variabilidade da intensidade da chuva e que a vazão de pico também irá depender da intensidade e do volume precipitado. Assim, o autor concluiu que esta alta correlação se deve ao fato de que ambas as variáveis são dependentes da energia da chuva. Na tentativa de explicar esta correlação, Duvert et al. (2012) formularam a hipótese de que a vazão máxima é uma variável significativa porque tem influência nas funções de produção e transferência de sedimentos: na produção, pois o escoamento superficial máximo é função da vazão máxima, e o escoamento superficial está diretamente relacionado com o desprendimento e transporte das partículas da encosta; e na transferência, pois a energia do fluxo na vazão máxima controla diretamente a capacidade de transporte, o revolvimento do sedimento que estava depositado e a erosão das margens.

2.4 INFLUÊNCIA DA ESCALA ESPAÇO-TEMPORAL NA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

Os processos hidrológicos acontecem em diferentes tipos de escala, tanto espaciais como temporais. A integração destas escalas é um dos grandes problemas que os pesquisadores enfrentam hoje, isto porque os métodos e os resultados variam de acordo com a escala em que o processo será estudado (JIONGXIN & YUNXIA, 2005; DEPINÉ et al., 2011). Segundo Klemeš (1983) problemas relacionados à escala ocorrem, pois estamos acostumados a ver a escala apenas de maneira quantitativa, em que uma simples redução ou aumento de tamanho pode ser realizado sem critério. De Boer & Campbell (1989) ressaltam que os problemas de mudanças de escala são peças fundamentais das pesquisas em bacias hidrográficas. Essas mudanças de escala envolvem, normalmente, algum tipo de extrapolação ou a transferência de informação através de escalas (BLÖSCHL & SIVAPALAN, 1995).

A interligação das escalas de espaço e de tempo tem uma importante função no desenvolvimento do conhecimento dos processos hidrológicos, entretanto esta relação é muitas vezes ignorada (KLEMEŠ, 1983).

2.4.1 Escala espacial

Os mecanismos fundamentais dos processos erosivos vêm sendo estudados em escala de laboratório, plot (pequenas áreas de metros quadrados), escala de pequenas bacias hidrográficas e de grandes bacias. Segundo De Boer & Campbell (1989) grande parte da teoria dos processos hidrológicos e geomorfológicos relacionados à dinâmica dos sedimentos têm sido desenvolvida a partir de experimentos em laboratório e em plot de microescala. Os autores comentam que extrapolar esta teoria para bacias em tamanho real tem sido uma tarefa difícil, pois a heterogeneidade e complexidade encontrada em bacias maiores torna esse trabalho complicado.

Pearsons et al. (2006) analisaram como a produção de sedimentos é influenciada pelos efeitos de escala do comprimento do plot. Concluíram que as taxas de erosão para encostas e bacias não podem simplesmente serem extrapoladas a partir da medição dos plot e que métodos para estimativa de erosão em grandes áreas devem ser desenvolvidos. De Boer & Campbell (1989) ressaltam que comparações na dinâmica do sedimento em micro e macroescala indicaram que os fatores importantes na microescala não são tão relevantes em macroescala e vice-versa. Vente & Poesen (2005) estudaram a produção de sedimentos em diferentes escalas espaciais em bacias do Mediterrâneo e concluíram que a taxa de erosão medida em certa escala da bacia não é representativa para avaliar a produção de sedimento em uma escala diferente.

Para Boer & Campbell (1989) extrapolar informações obtidas em microescala, plot experimental ou laboratório para um sistema muito maior requer o conhecimento das variáveis dependentes da escala e de suas relações. A extrapolação de micro para a macroescala não é um processo simples. Além disso, existem elementos na macroescala que não existem na micro, como a produção de sedimentos provenientes de estradas, por exemplo.

Apesar das dificuldades na extrapolação de escala, existem estudos onde são encontradas boas correlações entre escalas diferentes. Brasington et al. (2000) encontraram altas correlações entre a produção de sedimento monitorada em cinco bacias hidrográficas localizada nas montanhas do Nepal (entre 0,83 e 4,14 km²) e a estimativa realizada por meio de estudos de plot.

Tentativas de relacionar a produção de sedimentos com a área da bacia datam da metade do século XX (BRUNE, 1951). Em geral os estudos apresentam uma grande variabilidade nos resultados, sendo a relação entre produção de sedimento e área melhor definida quando consideradas regiões com similaridades fisiográficas (BIRKINSHAW & BATHURST, 2006). Porém, apesar desse problema, a área vem sendo utilizada como um fator de controle na produção de sedimentos da bacia e comparada a outros trabalhos em todo o mundo.

Geralmente existe uma relação negativa entre produção de sedimentos específica e área da bacia, ou seja, quanto maior a área menor a produção de sedimentos (WALLING, 1983; OWENS & SLAYMAKER, 1992). Dendy & Bolton (1976) tiveram como objetivo avaliar o efeito da área e do escoamento superficial médio anual na produção de sedimentos em 800 reservatórios dos EUA. Eles encontraram que a produção de sedimento específico foi inversamente proporcional a potência de 0,16 da área de drenagem. A Figura 1 mostra a tendência nas relações entre área e produção de sedimentos (suspensos e de leito) para alguns estudos.

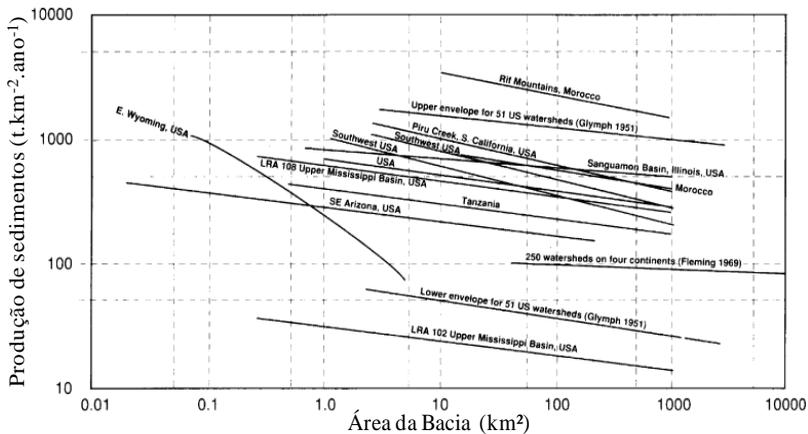


Figura 1 – Relações entre produção de sedimento e área baseado em trabalhos de alguns países (Adaptado de Owens & Slaymaker, 1992).

De acordo com Butzer (1984) essa relação negativa entre produção de sedimentos e área da bacia pode ser justificado por alguns fatores: primeiro, pequenas bacias geralmente possuem uma declividade média maior, o que facilita o acontecimento dos processos erosivos; segundo, uma chuva simples pode cobrir toda uma bacia pequena, o que

não acontece em bacias maiores; terceiro, com o aumento da bacia aumentam também as áreas com planícies de inundação, facilitando a deposição dos sedimentos nestes locais.

Correlações positivas entre área da bacia e produção de sedimentos também são encontradas. Poesen et al. (1996) quantificaram alguns processos erosivos em uma região de área agrícola abandonada havia 10 anos, as áreas variaram entre 0,002 e 0,100 km². Esse estudo demonstrou que o aumento da área normalmente também implicava no aumento da produção de sedimentos em torno de 1200 t.km⁻².ano⁻¹. Birkinshaw & Bathurst (2006) também acharam resultados semelhantes com o uso de um modelo distribuído SHETRAN. Esse fato ocorreu sempre que eram introduzidos no modelo usos de solo diferentes (floresta em altitudes maiores e plantações de trigo em altitudes menores, por exemplo) ou se o fornecimento de sedimento for principalmente proveniente da erosão do canal.

Em algumas situações, a relação entre área e produção de sedimento também pode variar com o aumento da bacia. Osterkamp & Toy (1997) demonstraram primeiramente uma correlação positiva com o aumento da bacia até certo tamanho (± 100 km²) e posteriormente negativa, quando esse tamanho limite era ultrapassado. Jiongxin & Yunxia (2005) também encontraram uma relação como esta para o rio Amarelo, na China, com o aumento da área a produção de sedimento também aumentou e, posteriormente, diminuiu. O limiar entre estas tendências, de diminuição e aumento da PSS, foi próximo ao valor de 2000 km². Segundo o autor, essa não linearidade pode ser explicada em termos de três fatores, o primeiro envolve o padrão espacial de distribuição do solo, o segundo envolve o ajuste do sistema geomorfológico na macro escala espaço-temporal e o terceiro envolve o dispêndio de energia que varia de acordo com a escala da bacia de drenagem.

A falta de uma relação universal entre tais variáveis ressalta a dificuldade de entender os processos dependentes de escala nas bacias hidrográficas e a dificuldade em estimar a produção de sedimentos em diferentes escalas.

2.4.2 Escala temporal

Além da variação espacial, os eventos também variam temporalmente na bacia hidrográfica. Os processos hidrossedimentológicos variam em escalas de tempo a partir de

segundos, horas, dias, meses e até anos (BLÖSCHL & SIVAPALAN, 1995; KUAI & TSAI, 2012).

Por estarem diretamente relacionados com a precipitação, os processos hidrossedimentológicos são altamente dependentes da escala temporal. Isto porque esses fenômenos meteorológicos não acontecem de maneira constante ao longo do tempo. Assim, os processos hidrossedimentológicos serão também dependentes das variações temporais em que tais fenômenos acontecem, como estações do ano, por exemplo.

Kuai & Tsai (2012) mostraram o forte impacto das ondas de cheias sobre as variações de fluxo e de sedimentos em grandes escalas temporais, bem como o impacto da turbulência do fluxo em pequenas escalas temporais

Hassan et al. (2010) analisaram quatro trechos do rio Yangtze, na China, entre 1956 e 2007, com o objetivo de encontrar as tendências na produção de sedimentos em suspensão e na perda de solo para cada trecho, assim como os efeitos da construção de uma barragem. Os autores encontraram diferentes ciclos temporais de troca de sedimentos, que chamaram de epiciclos, alguns maiores (15 a 40 anos) caracterizados pelo armazenamento de sedimentos finos, e outros menores (5 a 8 anos) normalmente associados a fluxo de sedimentos causados por grandes inundações.

Smith et al. (2003) estudaram a dinâmica espacial e temporal dos sedimentos em suspensão em um trecho de 55 km de planície no rio Swale durante um período de 2 anos, através de análise de eventos individuais de chuva. Os autores chegaram à conclusão de que parte da variação no fluxo de sedimentos da bacia é explicada em termos de tamanho do evento, distribuição e intensidade da precipitação e condições antecedentes da bacia.

Gao & Josefson (2012) estudaram as variações temporais do transporte de sedimentos em suspensão em uma bacia agrícola, com base em 3 anos de monitoramento. Concluíram que o transporte de sedimentos anual foi mais controlado pelas variações sazonais de uso e cobertura do solo do que pela alteração na vazão.

Hassan et al. (2010) analisaram tendências de longos períodos no rio Yangtze, entre 1956 e 2007, demonstraram que anos com grandes enchentes determinaram os padrões temporais e espaciais de transporte de sedimentos nos anos subsequentes. Smith et al. (2003) estabeleceram relações entre CSS e turbidez sendo uma curva para cada evento, demonstrando a variabilidade desta correlação no tempo (Figura 2). Smith et al. (2003) concluíram que a escala do evento e os padrões

sazonais tem grande influência na produção de sedimento anual da bacia.

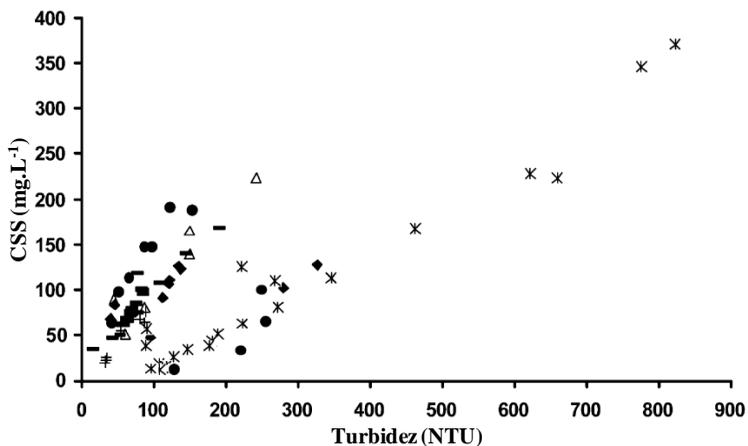


Figura 2 – Relação entre turbidez e concentração de sedimentos em suspensão durante eventos de chuva. Cada símbolo representa um evento (Adaptado de Smith et al., 2003).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

3.1.1 Localização

A área de estudo é formada pela bacia hidrográfica do Rio dos Bugres e por duas bacias embutidas a esta. Para este estudo, as bacias hidrográficas foram nomeadas da seguinte forma: a Bacia Hidrográfica do Rio dos Bugres foi chamada de RB01, e as bacias embutidas de RB10 e RB11, sendo esta última a menor (Figura 3). Estas bacias estão localizadas na região norte do estado de Santa Catarina, à aproximadamente 260 km de distância de Florianópolis. As bacias estão totalmente inseridas no município de Rio Negrinho e ficam entre as coordenadas UTM 7092134 a 7074604 e 642588 a 652049, referente ao datum SAD 69.

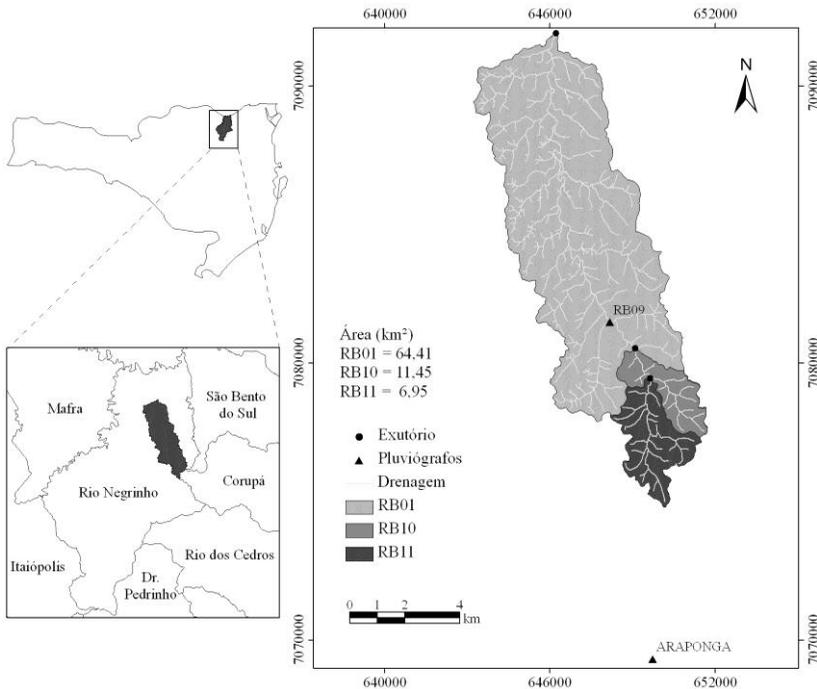


Figura 3 – Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Rio dos Bugres e locais de monitoramento.

3.1.2 Geologia

Segundo Santa Catarina (1986) o local em que está inserida a área de estudo possui embasamento de rochas sedimentares do grupo Itararé, Super-grupo Tubarão. Na parte norte da bacia o grupo Itararé é representado pela formação Mafra e na parte sul pela formação Rio do Sul. Tais unidades litoestratigráficas são resultado da deposição de extensas e espessas sequências de sedimentos predominantemente finos, desde os tempos do Carbonífero, há aproximadamente 340 milhões de anos, até o início do Mesozóico, há cerca de 230 milhões de anos. A deposição destes sedimentos formou estratos de siltitos, folhelhos, argilitos, arenitos, arcóseos e conglomerados, com intercalações de lentes e camadas de calcário e carvão (SANTA CATARINA, 1986).

3.1.3 Pedologia

Na região da bacia os solos predominantes são Cambissolos, que são solos minerais, não hidromórficos, caracterizados pela ocorrência de um horizonte B incipiente, definido pelo baixo gradiente textural, pela média a alta relação silte/argila ou pela presença de minerais primários de fácil decomposição. Cambissolos são derivados de rochas sedimentares com elevados teores de matéria orgânica e baixa fertilidade natural, ocorrendo em relevo ondulado e suave ondulado (SANTA CATARINA, 1986).

3.1.4 Clima

Segundo a classificação de Köeppen, o clima na região é do tipo Cfb, temperado constantemente úmido, sem estação seca, com verão fresco. A temperatura média do mês mais quente é menor que 22,0°C, a temperatura média anual varia de 15,5 a 17,0°C e a temperatura média das máximas varia de 24,0 a 26,6°C, e das mínimas de 10,8 a 11,8°C. A precipitação total anual pode variar de 1.360 a 1.670 mm, a umidade relativa do ar pode variar de 80,0 a 86,2% (EPAGRI, 2009).

3.1.5 Uso e cobertura vegetal

Originalmente, a área de estudo era caracterizada por Floresta Ombrófila Mista Montana, entretanto, com a antropização, parte desta vegetação foi retirada e o solo recebeu novos usos. A Figura 4 apresenta

o mapa de cobertura vegetal e dos principais usos do solo nas bacias de estudo e o mapa de declividade da bacia.

Na legenda da Figura 4, a classificação de determinadas áreas como solo exposto indica que, quando foi feita a imagem de satélite, utilizada na confecção deste mapa, o solo destas áreas se encontrava com pouca ou nenhuma vegetação. Como, pelas visitas a campo, se sabe que não existem grandes áreas com solo permanentemente exposto, se concluiu que esta imagem foi gerada durante período de entressafra de culturas. Tal informação é importante porque a falta de cobertura vegetal permanente poderia influenciar significativamente os resultados do estudo. Desta forma, as áreas caracterizadas como solo exposto na Figura 4 devem ser consideradas como áreas de agricultura.

A partir da Figura 4 foi gerada a Tabela 1, com os valores percentuais de cada uso do solo nas bacias.

Tabela 1 – Percentuais de uso do solo para todas as bacias.

Bacia	Usos do solo (%)						
	Reflorestamento	Foresta Nativa	Água	Agricultura	Pastagem	Solo Exposto	Estrada
RB01	19,5	56,3	0,1	2,7	10,7	8,9	1,8
RB10	14,8	79,4	0,0	0,5	4,1	0,1	1,1
RB11	16,1	75,5	0,0	0,8	6,8	0,2	0,6

3.1.6 Declividade

A partir do modelo digital de elevação do terreno foram criados o mapa de declividade das bacias (Figura 4) e os histogramas com a distribuição das declividades de cada bacia (Figura 5). A estatística básica dos valores de declividade, assim como a área das bacias, é apresentada na Tabela 2.

Se observa, no mapa de declividade e nos histogramas, que a distribuição das declividades é semelhante para todas as bacias. Tal fato é confirmado pelos dados da Tabela 2, os valores médios são de 11° a 12°, as mínimas foi 0° para todas as bacias e as máximas ficaram em entre 49° a 55°. Abrahams et al. (1988) relatam que em declividade inferiores a 12° a produção de sedimentos não apresentou muita variação, apenas a partir desse valor é que a declividade influenciou significativamente na produção de sedimentos.

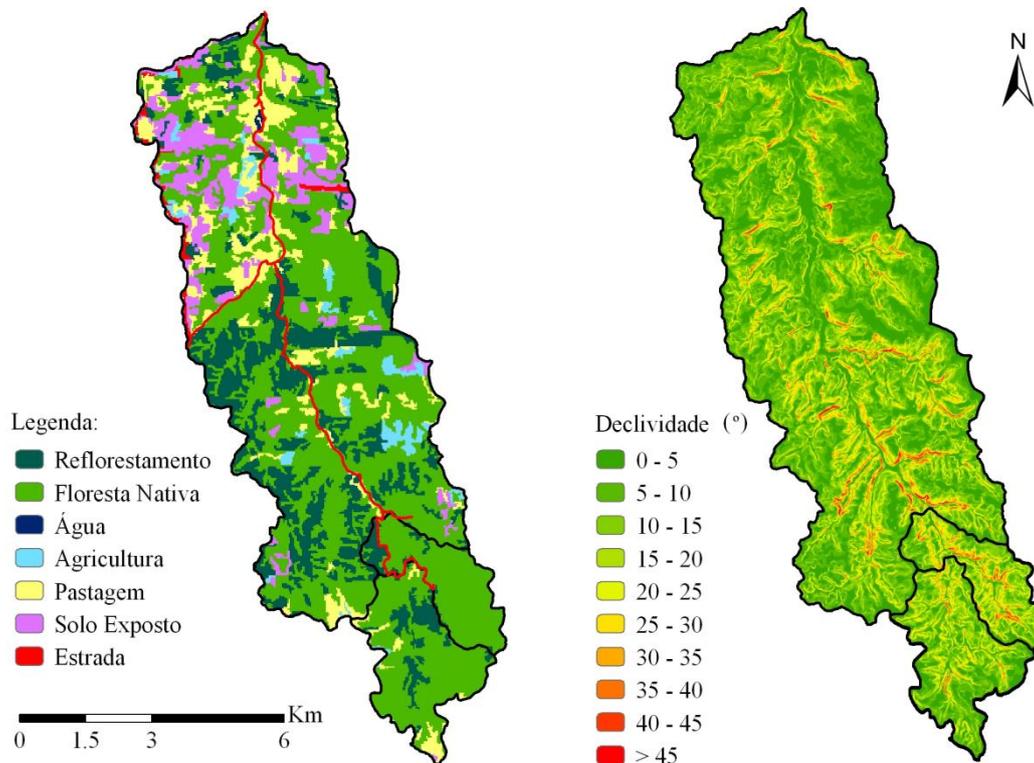


Figura 4 – Mapa de Usos do solo e cobertura vegetal e mapa de declividade das bacias RB01, RB10 e RB11.

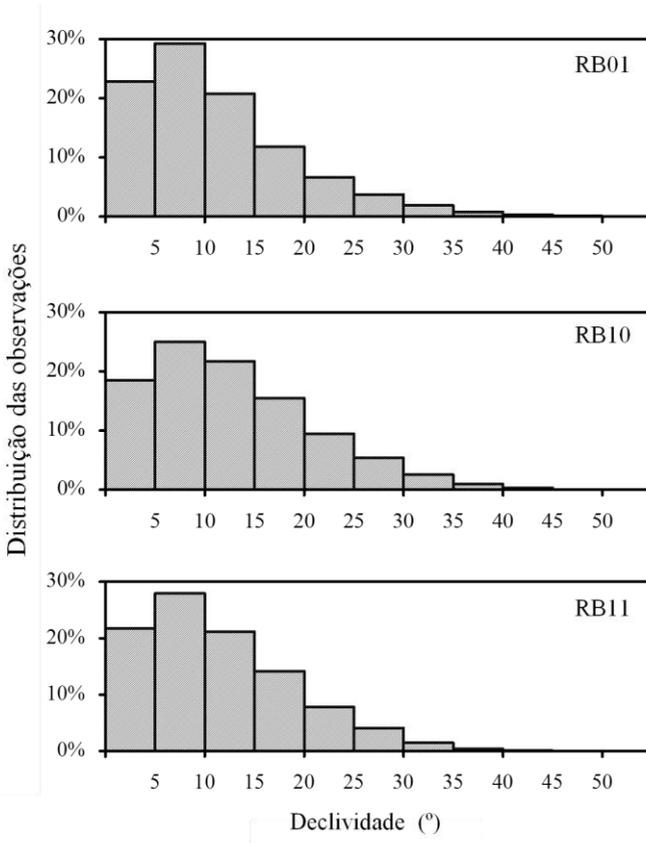


Figura 5 – Histograma percentual de distribuição da declividade para as bacias RB01, RB10 e RB11.

Tabela 2 – Tabela com informações de área e declividades para todas as bacias.

Bacia	Área (km ²)	Declividade (°)			Desvio Padrão
		Média	Mínima	Máxima	
RB01	64,41	11,3	0	54,5	8
RB10	11,45	12,8	0	53	8,3
RB11	6,95	11,4	0	49	7,5

3.2 MONITORAMENTO

O período de monitoramento utilizado neste estudo tem início em 16/12/2011 e final em 05/11/2012 (um total de 10 meses e 20 dias). Porém, devido a alguns problemas, as séries de dados das três bacias não são completas. Na bacia RB01 houve um problema com incrustações no leitor do sensor de turbidez, que foi solucionado apenas no dia 30/03/2012. Assim, os dados de turbidez nesta bacia só puderam ser usados a partir desta data. Nas bacias RB10 e RB11, devido à baixa incidência de luminosidade durante o inverno, os painéis solares não conseguiram fornecer energia suficiente para os sensores. Dessa forma, a bacia RB10 ficou dezoito dias (entre 29/06/2012 e 17/07/2012) e a bacia RB11 ficou sete dias (entre 09/07/2012 e 16/07/2012) sem armazenar os dados dos sensores.

3.2.1 Vazão

Os dados de cota foram coletados em estações fluviométricas instaladas no exutório das bacias RB01, RB10 e RB11 (Figura 3). A Figura 6 mostra as estações de monitoramento em cada bacia, discriminando o tipo de monitoramento que é realizado em cada uma delas. Para o monitoramento de cota foi utilizado um sensor de nível/pressão (modelo H-3121) na RB01 e sensores (modelo PTX 1030), nas sub-bacias RB10 e RB11. Os sensores foram ligados a “*Data Logger*”, modelo H-500XL, com intervalo de amostragem de 10 minutos.

Por meio de observação periódica das réguas limimétricas localizadas no exutório das bacias, foi possível estabelecer as relações entre a cota registrada pelos sensores de nível com os valores observados. No Apêndice A estão as curvas de relação dos sensores, as equações de regressão linear e os coeficientes de determinação de cada bacia.

Para todas as bacias o coeficiente de determinação foi de 0,99, sugerindo uma elevada correlação entre as variáveis. Tais resultados são esperados, visto que estes parâmetros estão diretamente relacionados e que a dispersão dos resultados é muito baixa. A partir destas equações, todos os registros dos sensores de nível foram transformados em cota observada.



Figura 6 – Estações de monitoramento no exutório das bacias: a) e b) bacia RB01, monitoramento de precipitação, turbidez e nível; c) bacias RB10 e d) RB11, monitoramento de nível e turbidez.

A curva-chave de vazão do exutório de cada bacia já havia sido estabelecida, por meio de medições de vazão e da seção transversal, pelo doutorando do laboratório de hidrologia, Fernando Grison (comunicação pessoal). Essas curvas-chave de vazão tem validade até a cota de margem plena das seções de monitoramento, após esse nível a confiabilidade da curva é reduzida devido ao aumento da incerteza. Por esse motivo todas as curvas possuem limite superior.

Na RB01 foi utilizada uma curva-chave de vazão com três Equações (3, 4 e 5) a seguir:

$$Cota \leq 1,16m \quad Q = 3,27 \cdot Cota^{2,60} \quad (3)$$

$$1,16m < Cota \leq 2,21m \quad Q = 3,11 \cdot Cota^{2,93} \quad (4)$$

$$2,21m < Cota \leq 2,25m \quad Q = 1,34 \cdot Cota^{3,98} \quad (5)$$

Para a bacia RB10 foi utilizada a seguinte curva-chave (Equações 6, 7 e 8):

$$Cota < 0,98m \quad Q = 2,51 \cdot Cota^{2,04} \quad (6)$$

$$0,98m \leq Cota < 1,22m \quad Q = 3,94 \cdot Cota - 1,43 \quad (7)$$

$$1,22m \leq Cota \leq 1,35m \quad Q = 2,03 \cdot Cota^{2,59} \quad (8)$$

E, para bacia RB11, utilizou-se a curva-chave a seguir (Equações 9 e 10):

$$Cota < 0,76m \quad Q = 1,61 \cdot Cota^{1,84} \quad (9)$$

$$0,76m \leq Cota \leq 1,22m \quad Q = 1,79 \cdot Cota^{2,00} \quad (10)$$

3.2.2 Precipitação

Para o monitoramento da precipitação foram utilizados, inicialmente, os dados de três estações pluviométricas automáticas do LabHidro, localizadas em três pontos: exutório da bacia RB01 (Figura 6 a) e pontos RB09 e Araponga, apresentados na Figura 3. Entretanto, devido a problemas de vandalismo, após o dia 09/05/2012 não foi mais possível utilizar a estação do ponto RB09.

O método de Thiessen foi utilizado para realizar a distribuição espacial dos valores medidos pelos pluviógrafos e encontrar um valor médio de precipitação para cada bacia. A Tabela 3 mostra os pluviógrafos utilizados em cada bacia para o período anterior e posterior a desativação do pluviógrafo RB09.

Tabela 3 – Pluviógrafos utilizados no método de Thiessen para cada bacia.

Bacia	Período	
	16/12/2011 a 09/05/2012	09/05/2012 a 05/11/2012
RB01	RB01, RB09 e Araponga	RB01 e Araponga
RB10 e RB11	RB09 e Araponga	Araponga

Nas estações RB01 e RB09 o monitoramento pluviométrico é realizado automaticamente com frequência de 10 minutos. Na estação Araponga o monitoramento é realizado a cada 5 minutos, estes dados foram transformados para 10 minutos para serem utilizados no método de Thiessen junto com os dados dos outros pluviógrafos.

3.2.3 Sedimentos em suspensão

O monitoramento contínuo da turbidez foi realizado no exutório das bacias RB01, RB10 e RB11 (Figura 6 b, c, d) através do sensor digital de turbidez modelo DTS-12 (Figura 7). Este modelo de sensor já vem calibrado pelo fabricante e possui a vantagem de ter baixa necessidade de manutenção porque apresenta um limpador automático de sensor que passa duas vezes sobre o leitor óptico a cada vez que o aparelho é acionado. Este dispositivo ajuda a evitar problemas de incrustações e, segundo o fabricante, permite com que o aparelho realize leituras precisas, entre a faixa 0 - 1.600 NTU, por no mínimo 12 meses sem necessidade de manutenção. Estes sensores estão configurados para a realização de leituras a cada 10 minutos.

Para estabelecer a relação entre turbidez e sólidos em suspensão foram realizadas coletas de água e análises de sólidos suspensos totais em laboratório através do método de filtração. As coletas (Figura 8) foram feitas com o auxílio do amostrador de sedimentos, de fabricação nacional, modelo AMS-1. Conforme Carvalho (1994) este modelo é mais leve que os demais e serve para amostragens com haste ou cabo, podendo ser operado a vau, a canoa ou em pontes pequenas, com lâminas d'água de até 1,5m.



Figura 7 – Sensor de turbidez modelo DST-12 equipado com dispositivo de limpeza do sensor óptico.

Foram realizadas coletas em 3 seções verticais do rio pelo método de igual incremento de largura (CARVALHO, 1994). O amostrador por integração na vertical permite a obtenção da amostra através da descida

e subida do equipamento entre a superfície até o fundo do rio. As amostras foram coletadas o mais próximo possível da seção de monitoramento de turbidez.



Figura 8 – Coleta de amostras para análise de sedimentos em suspensão pelo método de Igual Incremento de Largura.

Após coletadas, as amostras foram preservadas em recipientes adequados e encaminhadas para o LIMA (Laboratório Integrado de Meio Ambiente) do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC. Para evitar a proliferação de matéria orgânica e alteração no resultado se utilizou o prazo de sete dias para realização das análises, contados a partir do momento da coleta. Durante este período as amostras foram mantidas sob-refrigeração.

As amostras foram analisadas através do método de filtração a vácuo (Figura 9), conforme Carvalho (1994). Nesse método não é necessário fazer a correção do resultado para sais dissolvidos, porque estes passam pelo filtro, ou seja, o resultado da análise já está em CSS (CARVALHO, 1994).

Foram utilizados filtros de acetato de celulose com tamanhos de poro de $0,45 \mu\text{m}$. O volume filtrado dependeu da turbidez de cada amostra, variando entre 200 e 500 mL, nas amostras acima de 100 NTU foram filtrados 200 mL e nas amostras abaixo desse valor foram filtrados 500 mL. Todas as amostras foram analisadas em duplicata. O método se resume nas seguintes etapas: primeiramente, os filtros foram limpos e pesados em uma balança analítica para o conhecimento de sua massa; depois as amostras foram passadas através dos filtros, que retinham as partículas maiores ao seu tamanho; e, por fim, os filtros

foram secos e pesados novamente, para o conhecimento da massa de sedimento presente na amostra. Após realizadas as análises, os valores foram utilizados na Equação 11.



Figura 9 – Bancada para análise de sedimentos em suspensão pelo método de filtração a vácuo.

$$CSS = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 10^6}{V} \quad (11)$$

onde m_1 é a massa inicial do filtro (g), m_2 é a soma da massa do filtro e do sedimento retido por ele (g) e V é o volume de amostra filtrado (mL).

Inicialmente as coletas foram realizadas a cada quinze dias, que é o intervalo padrão de monitoramento das bacias sob responsabilidade do LabHidro/UFSC. Entretanto, até metade do ano de 2012 ainda não se tinha coletado amostras com valor de turbidez acima de 100 NTU. A partir dessa época, para que fosse possível coletar amostras com valores maiores, se começou a verificar a previsão do tempo e a entrada de frentes frias na região.

Durante o monitoramento foram encontradas dificuldades para que fosse possível realizar a coleta de amostras com concentrações de sedimento elevadas. A principal foi o tempo de deslocamento até as bacias, que inviabilizou o deslocamento para o local no instante em que a precipitação se inicia, visto que o tempo de concentração das bacias é menor que o tempo de deslocamento.

Assim, a solução encontrada foi monitorar as entradas de frente frias na região, para que a possibilidade da ocorrência de precipitação nas bacias de estudo fosse maior. Dessa maneira, foram feitas algumas idas a campo para a coleta de amostras, sendo as primeiras sem sucesso,

até que em 23 de outubro de 2012 se conseguiu, durante um evento, coletar amostras consideradas satisfatórias.

3.2.4 Consistência dos dados

O registro automático de turbidez pode apresentar inconsistências em seus dados por uma série de motivos como: mau posicionamento do sensor, interferência da luz solar ou mesmo por objetos ou plantas que podem obstruir o sensor. Por esses motivos, antes de serem transformados em CSS, estes dados devem passar por uma avaliação criteriosa.

Os dados de turbidez foram consistidos usando a comparação com os dados de cota do evento (Figura 10). Desta maneira, foi possível verificar se os picos de turbidez foram gerados durante eventos de chuva ou não. Os valores de turbidez incoerentes foram corrigidos. O método utilizado para esse procedimento foi apagar o valor discrepante da série e depois fazer a média dos valores registrados anteriormente e posteriormente a este dado.

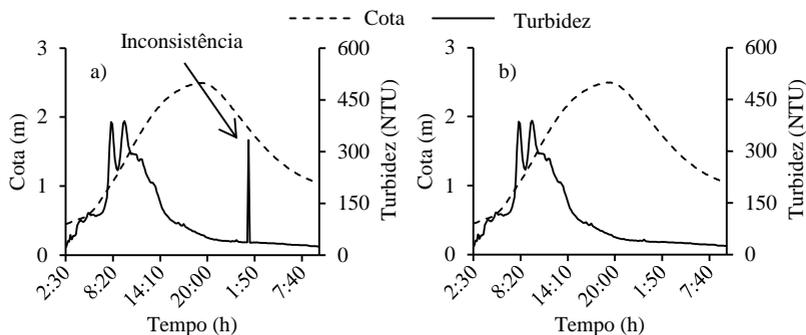


Figura 10 – Exemplo de correção de inconsistência nos dados a) sedimentograma com inconsistência b) sedimentograma corrigido.

3.3 FATORES DE CONTROLE DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO EM EVENTOS

3.3.1 Identificação e delimitação de eventos

Neste trabalho, o termo “evento” é utilizado como sinônimo de um evento hidrossedimentológico que abrange a precipitação e a ascensão e o decréscimo do hidrograma e do sedimentograma.

Nem todos os eventos registrados durante o período de monitoramento foram analisados e utilizados na análise de regressão. Eventos “complexos” com vários picos de vazão seguidos não foram analisados devido à dificuldade de separação destes eventos.

Após identificar os eventos, teve início o processo de delimitação, que foi realizada com base no comportamento da precipitação, do hidrograma e do sedimentograma. Essa delimitação foi utilizada para o cálculo das variáveis de cada evento e, sua delimitação inicial, foi feita de duas formas: uma para as variáveis relacionadas à vazão e sedimentos em suspensão e outra para as variáveis de precipitação.

A delimitação do início dos eventos para as variáveis relacionadas à vazão e a sedimentos em suspensão foi realizada da seguinte forma: o início foi selecionado a partir do momento em que a vazão ou a CSS começou a subir, isto é, assim que o primeiro (Q ou CSS) registrou aumento. No caso da Figura 11 o aumento da CSS teve início antes do aumento da vazão. Nessa delimitação o tempo entre o início da precipitação e a elevação da vazão ou da CSS não foi levada em consideração, porque se assume que a quantidade de sedimento transportada nesse período não é resultante da precipitação do evento e sim das condições anteriores da bacia. A delimitação do início dos eventos para as variáveis relacionadas à precipitação foi feita a partir do início da chuva que gerou esses eventos (Figura 11).

Como delimitação para o término dos eventos de precipitação foi considerado o limite de uma hora sem chuva. Para a delimitação do término do evento de vazão e sedimentos em suspensão foi considerada quando o valor da CSS chegou ao mesmo valor que estava imediatamente antes do início de sua ascensão (Figura 11).

Para o uso na análise de regressão, depois de identificados e delimitados, foram excluídos os eventos considerados extremos. Nesse estudo eventos extremos são considerados aqueles cuja vazão ultrapassou a cota de margem plena. Tais eventos podem influenciar significativamente a tendência das relações. Além disso, devido à extrapolação nas relações de vazão e cota, o nível de incerteza relacionado à estimativa de vazão desses eventos é bastante elevado. Assim, para exclusão desses eventos, foram criados limites de cota para cada bacia. Esses limites foram estabelecidos de modo que a cota do evento não ultrapassasse a cota de margem plena.

Durante o período monitorado na bacia RB01 apenas três eventos ultrapassaram a cota de margem plena. Nas bacias RB10 e RB11 quatro

eventos, em cada bacia, ultrapassaram a cota estabelecida como margem plena.

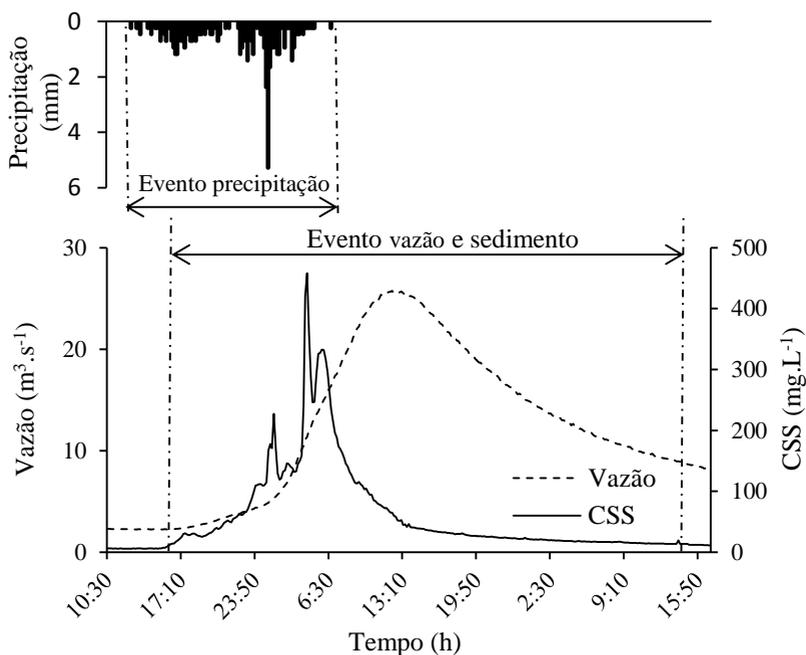


Figura 11 – Exemplo de delimitação de eventos.

3.3.2 Descrição dos fatores selecionados

Foram selecionados alguns fatores que pudessem ter correlações com a *PSS* do evento. Além de fatores relacionados ao evento, também foram selecionados fatores anteriores a este, com o intuito de verificar alguma correlação da *PSS* com as condições antecedentes das bacias. Todos os fatores selecionados estão relacionados com os dados de vazão, precipitação e sedimentos em suspensão obtidos durante o monitoramento. Os fatores selecionados, assim como suas definições e unidades, estão apresentados na Tabela 4.

O índice de precipitação antecedente (*API*) representa as condições iniciais de umidade da bacia. Neste trabalho esse índice foi calculado da seguinte forma:

$$API(n) = \sum_{i=1}^n P_i \left(\frac{1}{2}\right)^{i-1} \quad (12)$$

onde $API(t)$ é o índice de precipitação antecedente (mm), n é o número de dias antecedentes utilizado no índice, P_i é a precipitação acumulada no dia i (mm)

A taxa de incremento de vazão (TiQ) é um outro índice que foi utilizado nesse trabalho:

$$TiQ = \frac{(Q_{max} - Qi)}{t_{pico}} \quad (13)$$

onde TiQ é a taxa de incremento de vazão ($m^3.s^{-1}.h^{-1}$) Q_{max} é a vazão máxima do evento ($m^3.s^{-1}$), Qi é a vazão inicial ($m^3.s^{-1}$) e t_{pico} é o tempo decorrido entre o início do evento e a vazão máxima do evento (h).

Este fator permite levar em consideração a taxa de aumento da vazão. Assim, duas outras características, que estão diretamente relacionados à produção de sedimentos, são integradas. A primeira é a intensidade da precipitação, pois quanto mais intensa a precipitação maior a taxa de aumento da vazão, sendo que a precipitação esta diretamente ligada à ocorrência dos processos erosivos. A segunda é a capacidade de transporte, pois geralmente quanto maior a taxa de aumento da vazão maior a capacidade de transporte de sedimento e de remobilização de sedimento de fundo.

Tabela 4 – Fatores de controle da PSS utilizados para modelo de regressão.

	Fator	Símbolo	Definição	Unidade
Pré-Evento	Vazão antecedente	Qa	Última vazão registrada pelo sensor antes do início do evento.	$m^3.s^{-1}$
	Vazão antecedente de 1 dia	Qa_1	Média da Vazão das 24h anteriores ao evento.	$m^3.s^{-1}$
	Índice de precipitação antecedente 5 dias	API_5	Índice da chuva dos 5 dias anteriores, a partir do início da chuva que deu origem ao evento.	mm
	Índice de precipitação antecedente 3 dias	API_3	Índice da chuva dos 3 dias anteriores, a partir do início da chuva que deu origem ao evento.	mm
Evento	Duração do evento	t	Tempo entre o início e o final do evento hidrossedimentológico	h
	Precipitação total	Pte	Precipitação total acumulada do evento de precipitação	mm
	Tempo de precipitação	tP	Duração da precipitação do evento de precipitação.	h
	Índice de Precipitação	IP	Quantidade de chuva acumulada entre o início da precipitação e o seu pico.	mm
	Intensidade da Precipitação de 10 minutos	IP_{10}	Altura máxima registrada pelo pluviógrafo em 10 minutos.	mm
	Tempo de pico	t_{pico}	Tempo entre o início e o pico (máxima) da vazão do evento.	h
	Taxa de Incremento de Vazão	TiQ	Varição que a vazão teve entre o início e o pico do evento dividido pelo tempo entre início e o pico da vazão.	$m^3.s^{-1} h^{-1}$
	Vazão máxima específica	Qme	Vazão máxima do evento, dividida pela área da bacia.	$mm.dia^{-1}$
	Vazão média	$Qmed$	Vazão média de todo o evento.	$m^3.s^{-1}$
	Concentração máxima de Sedimentos em Suspensão	$CSSm$	Máxima concentração durante o evento.	$mg.L^{-1}$
Produção de sedimentos em suspensão específica	PSS	Soma de toda a carga de sedimentos em suspensão transportada no evento dividida pela área da bacia.	$kg.km^{-2}$	

3.4 TRATAMENTO ESTATÍSTICO E ANÁLISE DE REGRESSÃO

3.4.1 Transformação das variáveis

Muitos fenômenos na hidrologia apresentam distribuição de probabilidade com curva assimétrica positiva, como é o caso da vazão, da precipitação e da CSS. Isto acontece porque tais fenômenos usualmente permanecem em valores menores na escala de variação na maioria do tempo, alcançando valores maiores apenas poucas vezes, durante eventos de chuva. Por tais motivos, as variáveis não seguem uma distribuição normal ou gaussiana.

Segundo Stedinger (1980), os parâmetros hidrológicos são semelhantes a uma distribuição do tipo log-normal. Naghettini & Pinto (2007) também comentam que a distribuição log-normal é uma forma paramétrica que pode se adequar muito bem na modelação de fenômenos hidrológicos, isso porque a variável log-normal é positiva e tem como coeficiente de assimetria um valor não fixo e sempre maior que zero. A partir desses pressupostos, as variáveis derivadas da vazão, da precipitação e da concentração de sedimentos em suspensão deste trabalho foram normalizadas com a aplicação da transformação log-neperiano.

3.4.2 Tabelas de correlação

Para encontrar as variáveis com maior relação com a variável dependente (*PSS*) foram feitas análises de correlação utilizando o coeficiente de correlação linear de Pearson. Para a criação das matrizes de correlação foi utilizado o *software* Statistica 8.0.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) é uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis com distribuição normal. Este coeficiente varia entre os valores -1 e 1. O valor 0 significa que não há relação linear, o valor 1 indica uma relação linear positiva perfeita e o valor -1 também indica uma relação linear perfeita mas inversa. Quanto mais próximo estiver de 1 ou -1, mais forte é a associação linear entre as duas variáveis (MONTGOMERY & RUNGER, 2003). O estimador do coeficiente de correlação linear de Pearson é dado por:

$$r = \frac{S_{X,Y}}{S_X S_Y} \quad (14)$$

onde r é o coeficiente de correlação linear, $S_{X,Y}$ é a covariância entre as variáveis, S_X e S_Y são os desvio-padrão das amostras.

A covariância amostral entre duas variáveis é calculada pela equação:

$$S_{X,Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n-1} \quad (15)$$

onde $S_{X,Y}$ é a covariância amostral entre as variáveis X e Y , \bar{x} e \bar{y} são as médias de cada uma das variáveis, n é o tamanho da amostra e x_i e y_i são as observações das variáveis.

O desvio-padrão das amostras é calculados pelas equações:

$$S_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (16)$$

$$S_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (17)$$

onde S_X e S_Y são os desvios-padrão das variáveis X e Y , \bar{x} e \bar{y} são as médias de cada uma das variáveis, n é o tamanho da amostra e x_i e y_i são as observações das variáveis (NAGHETTINI & PINTO, 2007).

3.4.3 Análise de regressão multivariada

Após a seleção das variáveis independentes, através dos testes de correlação, foi realizada a análise de regressão múltipla. Esta análise tem o objetivo de compreender a relação entre as variáveis independentes, ou predictoras, e a variável dependente, ou variável resposta.

O problema geral a ser resolvido na análise de regressão múltipla é ajustar uma linha reta para um número de pontos. No *software* Statistica 8.0, utilizado nesse estudo, para estimar a reta que mais se aproxima dos pontos observados, é utilizado o método dos mínimos quadrados.

Em alguns casos é necessário aplicar pesos diferentes para as variáveis da análise de regressão, nesse caso é realizado o cálculo da regressão ponderada dos mínimos quadrados. Este método é normalmente aplicado quando as variâncias dos resíduos não são constantes no intervalo dos valores da variável independente.

De maneira geral, a regressão múltipla irá estimar uma equação linear na seguinte forma:

$$Y = a + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + \dots + b_p \cdot X_p \quad (18)$$

a variável Y pode ser expressa em termos de uma constante (a) e da inclinação (b) vezes a variável X . O parâmetro b_p indica a mudança na resposta média com acréscimo de uma unidade na variável preditora X_p .

O método utilizado para entrada das variáveis na análise do modelo foi o sequencial *Stepwise*. Regressão *Stepwise* é uma técnica de construção de modelos que encontra subconjuntos de variáveis preditoras que mais adequadamente predizem respostas sobre a variável dependente por regressão linear (ou não-linear), atendendo aos critérios especificados para adequação do ajuste do modelo. No método *Stepwise* foram utilizados as opções de regressão *Forward stepwise* e *Backward stepwise*. Com a regressão *Forward stepwise* é possível adicionar ou eliminar as variáveis independentes do modelo em cada etapa da regressão, dependendo da escolha dos valores de *F in* e *F out*, até obter o modelo de melhor regressão. A regressão *Backward stepwise* permite remover as variáveis independentes da equação de regressão uma de cada vez, também por meio da escolha dos valores de *F in* e *F out*. Esses valores de *F (in e out)* determinam o quão significativo deve ser a contribuição de uma variável na equação de regressão em ordem que ela possa ser adicionada (*Fin*) ou removida (*Fout*) da equação (STATSOFT, 2007).

Na regressão *Forward stepwise* primeiro foi forçada a entrada de todas as variáveis na equação, através da escolha de baixos valores *Fin* e *Fout*. Assim também foi feito para a regressão *Backward stepwise*, primeiramente foram removidas todas as variáveis da equação, uma por vez, depois foram escolhidos altos valores de *Fin* e *Fout*, para que fosse possível observar as variáveis que entraram primeiro na equação. Esses passos foram repetidos até que os valores significativos encontrados na regressão *Forward stepwise* fossem os mesmos encontrados na regressão *Backward stepwise*.

A validação dos modelos de regressão gerados levou em consideração a análise residual. Essa análise consiste em técnicas utilizadas para investigar a adequabilidade de um modelo de regressão com base nos resíduos. Para a construção dos modelos de regressão foram consideradas algumas hipóteses referentes aos resíduos. Os resíduos foram considerados independentes, com média igual à zero, distribuição normal e variância constante. Dessa forma, se o modelo gerado for adequado, os resíduos devem evidenciar tendências que provem essa afirmação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MONITORAMENTO

4.1.1 Relações entre concentração de sedimentos em suspensão e turbidez

Foram coletadas 19 amostras de CSS para a bacia RB01, os valores de concentração variaram entre 3,8 e 338 mg.L⁻¹. Nessa bacia foram criadas duas curvas de ajuste da relação entre CSS e turbidez (*Turb*).

A primeira curva de ajuste possui apenas uma equação (Equação 19) como mostra a Figura 12 a).

$$CSS = 2,28 \cdot Turb \quad (19)$$

A segunda curva de ajuste possui duas equações (Equações 20 e 21). A Equação 20 é utilizada até o valor de 37,47 NTU e a Equação 21 é utilizada acima desse valor. O gráfico da segunda curva de ajuste é apresentado na Figura 12 b).

$$Turb \leq 37,47 \quad CSS = 1,15 \cdot Turb \quad (20)$$

$$Turb > 37,47 \quad CSS = 2,89 \cdot Turb - 65,2 \quad (21)$$

A primeira curva de ajuste (Figura 12 a) apresentou um bom coeficiente de determinação, 0,94. Porém, existe certa dispersão das amostras nesse ajuste. Isto ocorreu principalmente para as amostras abaixo de 100 NTU, onde houve uma superestimativa nos resultados de CSS.

Visualmente identifica-se duas tendências diferentes nas amostras da Figura 12 a). Uma linear e bem definida para valores menores, de até 60 NTU e outra para amostras acima deste valor.

Ekern (1977) também encontrou correlações diferentes entre turbidez e CSS. Até 100 NTU o autor encontrou uma correlação linear e outra correlação, não linear, foi encontrada acima deste valor. Tal estudo auxiliou na decisão de criar uma segunda curva de ajuste da relação entre turbidez e CSS com duas Equações (Figura 12 b), uma para valores menores e outra para valores maiores. A criação de uma curva de ajuste com duas equações teve como objetivo melhorar o ajuste das retas com os resultados das amostras.

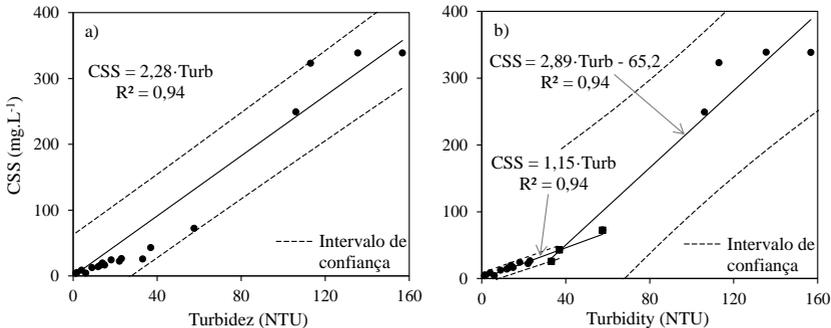


Figura 12 – Gráfico e equação das duas curvas de ajuste entre turbidez e CSS para a bacia RB01, a) primeira curva de ajuste, com apenas uma equação, b) segunda curva de ajuste, com duas equações.

Na Equação 20, é visível a relação linear existente entre as amostras, essa equação foi criada a partir das amostras com valores entre 1,3 e 57,6 NTU.

Para a criação da Equação 21 inicialmente se utilizou apenas o último ponto que foi utilizado na Equação 20 (57,6 NTU). Porém a dispersão das amostras foi alta, e o coeficiente de determinação baixo. Posteriormente foram feitas tentativas com a utilização dos dois, três e dos quatro últimos pontos da Equação 20. Dentre estas tentativas, a que utilizou as três últimas amostras da Equação 20, foi a que apresentou melhor resultado. As amostras representadas por um quadrado na Figura 12 b) são as amostras que foram utilizadas para a geração das Equações 20 e 21.

Na bacia RB10 foram coletadas 10 amostras de sedimentos em suspensão, com concentrações que variaram entre 2,4 e 131 mg.L^{-1} . A Figura 13 apresenta o gráfico da curva de correlação com as amostras, o intervalo de confiança (95%) e a Equação 22 para a bacia RB10.

$$\text{CSS} = 1,84 \cdot \text{Turb} \quad (22)$$

Dentre as curvas de ajuste testadas, a equação linear foi a que apresentou melhor ajuste para a bacia RB10, com coeficiente de determinação de 0,95.

A Figura 14 apresenta a curva de correlação, o intervalo de confiança (95%) e a Equação 23, gerada para bacia RB11. As amostras tiveram variação de CSS entre 1,2 e 192 mg.L^{-1} . O coeficiente de determinação foi de 0,94. Assim como na bacia RB10, a maioria das amostras ficou concentrada nos valores abaixo de 20 NTU.

$$CSS = 2,08 \cdot Turb \quad (23)$$

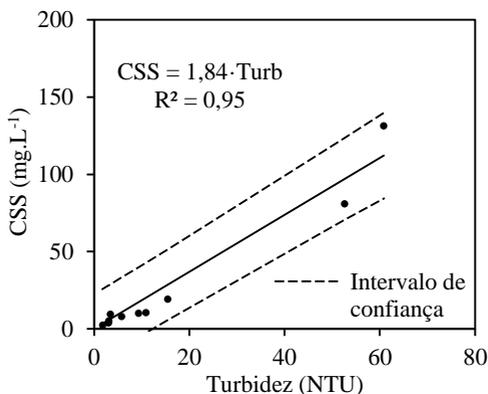


Figura 13 – Gráfico e equação da curva de ajuste entre turbidez e CSS para a bacia RB10.

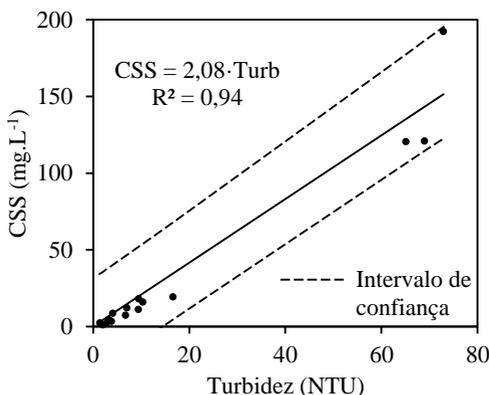


Figura 14 - Gráfico e equação da curva de ajuste entre turbidez e CSS para a bacia RB11.

Diferente das amostras da bacia RB01, nas bacias RB10 e RB11 os valores de CSS coletados foram menores, principalmente, devido a dois motivos: o primeiro é a rápida resposta destas pequenas bacias aos eventos de chuva, o que torna rápida também a variação da CSS e dificulta a coleta de amostras; e o segundo motivo é que nestas bacias a CSS, mesmo durante eventos de chuva, é sempre menor quando comparada a RB01, o que se deve, provavelmente, ao uso dos solos destas bacias, que é predominantemente de reflorestamento e floresta nativa, conforme Tabela 1.

4.1.2 Sedimentograma e hidrograma

Depois de definidas as correlações entre cota e vazão e entre turbidez e CSS para todas as bacias, foi gerado o banco de dados para este estudo. A seguir são apresentados os períodos monitorados para as bacias RB01(Figura 15), RB10 (Figura 16) e RB11 (Figura 17), para todas as figuras, a linha reta tracejada na horizontal indica o valor máximo de CSS coletado em cada bacia.

Na Figura 15 a linha vertical com traços maiores separa os dados confiáveis e os dados considerados não confiáveis. Os dados considerados não confiáveis são aqueles registrados no período em que o sensor de turbidez da bacia RB01 estava com problemas de incrustação. Neste trabalho todas as análises de SS realizadas com a série de dados da RB01 levaram em consideração apenas o período considerado confiável. Na Figura 15 estão apresentadas os resultados gerados com as duas curvas de ajuste (Turbidez x CSS) geradas para a bacia RB01, a CSS1 é o ajuste com apenas uma equação (Figura 12 a) e a CSS2 é o ajuste que utilizou duas equações (Figura 12 b). Observando toda a série da RB01 verifica-se que para valores menores de turbidez a primeira curva de ajuste (CSS1) gera valores maiores de concentração quando comparada a segunda curva de ajuste (CSS2). Enquanto que para valores maiores de turbidez a CSS2 gera concentrações maiores de sedimentos em suspensão que a CSS1. Esse fato pode ser observado na ampliação do evento que ocorreu entre 18/06/12 e 20/06/12, apresentado no quadrado menor da Figura 15.

A Figura 16 e Figura 17 apresentam a série de dados das bacias RB10 e RB11, respectivamente. As linhas contínuas representam a CSS e as tracejadas a vazão. Também são apresentados os períodos em que estas bacias ficaram sem monitoramento (linhas com traços maiores), dezoito dias na RB10 e sete dias na RB11.

Em todos os gráficos de hidrogramas dos períodos monitorados (Figura 15, Figura 16 e Figura 17) o eixo da vazão foi deslocado para facilitar a visualização dessa variável.

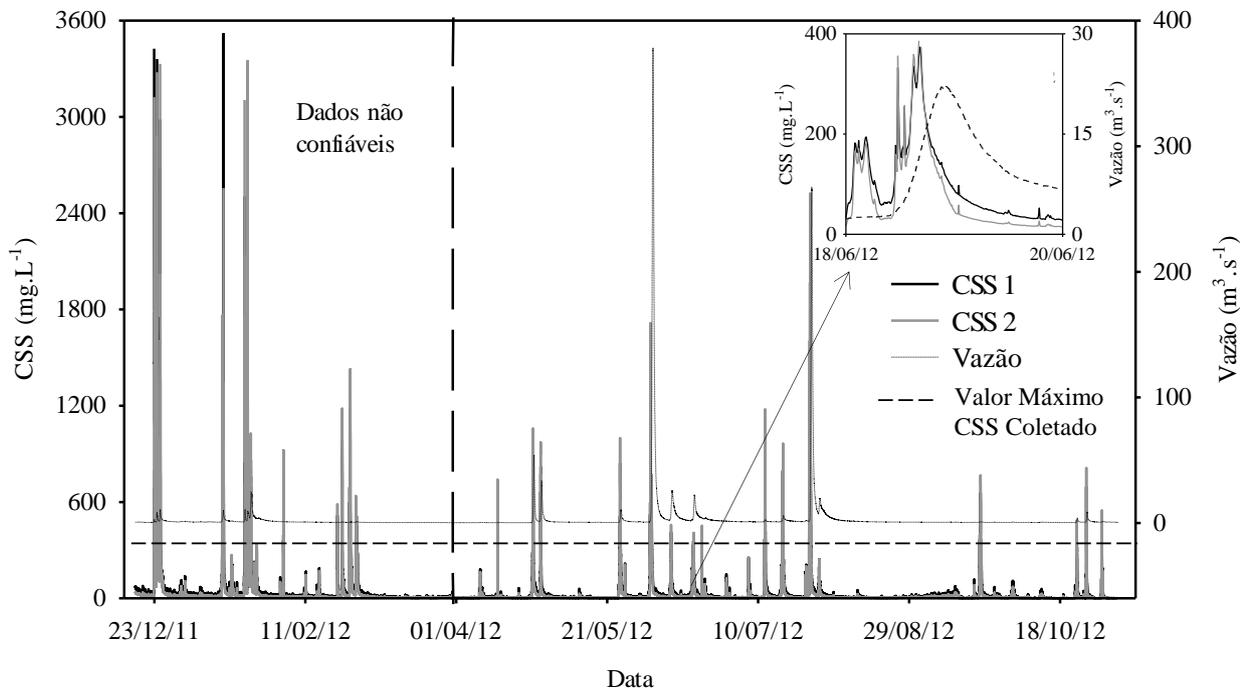


Figura 15 – Vazão e Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS) para toda a série monitorada da bacia RB01. CSS1 são os resultados de concentração de sedimento em suspensão gerados a partir da primeira curva de ajuste e CSS2 são os resultados gerados a partir da segunda curva de ajuste.

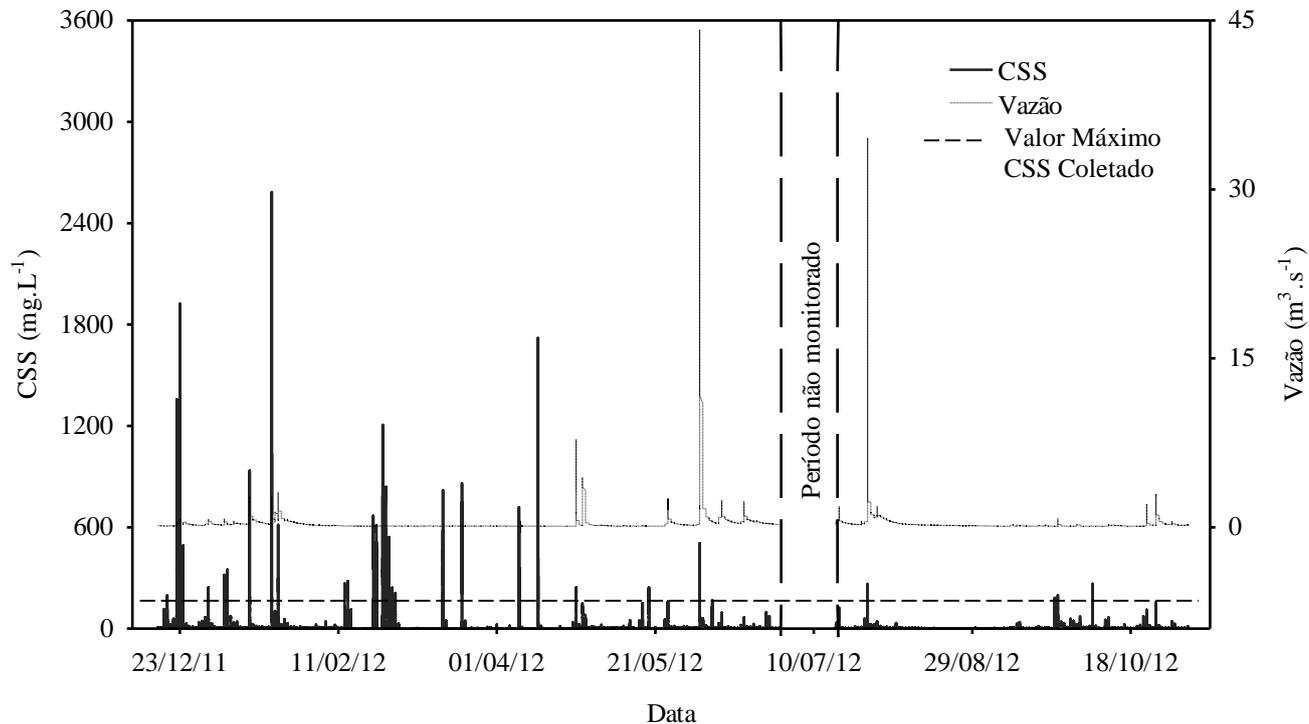


Figura 16 - Vazão e Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS) para toda a série monitorada da bacia RB10.

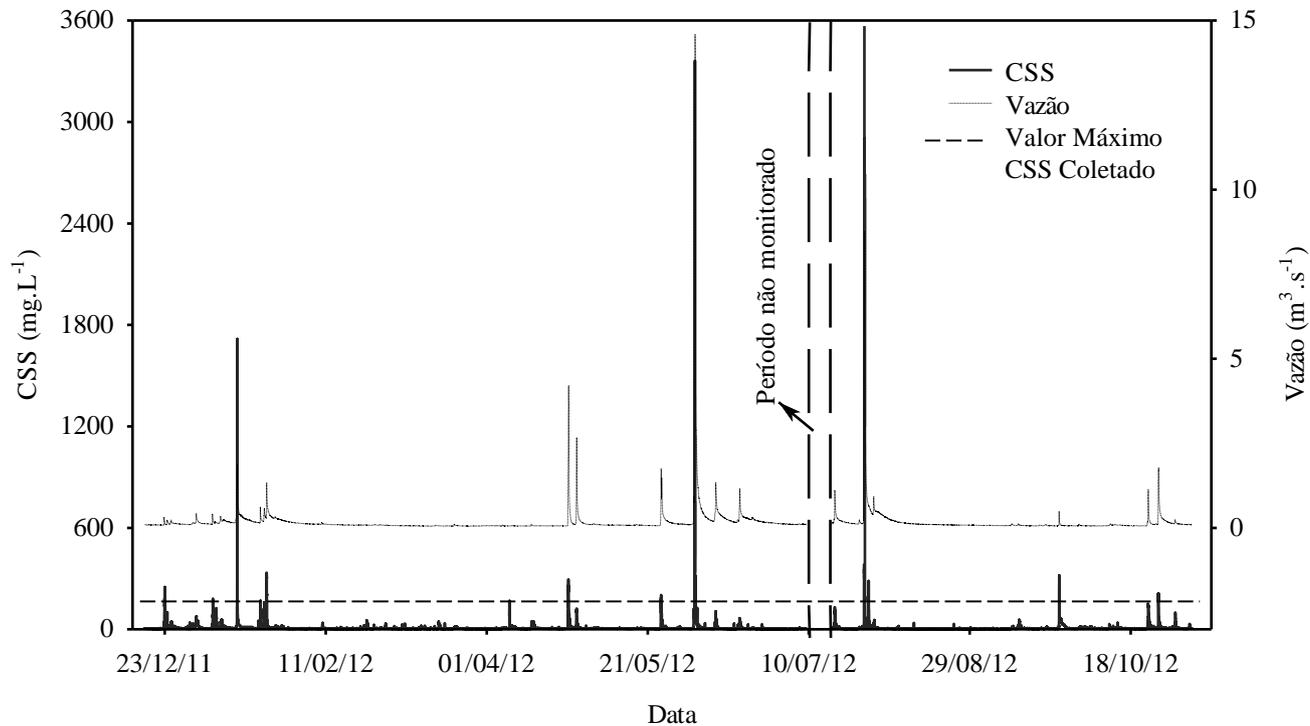


Figura 17 - Vazão e Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS) para toda a série monitorada da bacia RB11

4.2 ESTIMATIVA DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO

As estimativas de *PSS* foram realizadas considerando-se toda a série monitorada, separando-se por mês, incluindo também os eventos de maior magnitude. Tais eventos possuem incertezas devido à extrapolação das correlações, o que deve ser levado em consideração.

Durante o período monitorado na bacia RB01 (de 16/12/2011 a 05/11/2012) a precipitação mensal máxima foi de 223 mm, no mês de junho, e a mínima 3 mm em agosto. A maior vazão média mensal também aconteceu no mês de junho, $13,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e a mínima no mês de março, $0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Figura 18).

A *PSS* mensal calculada é o produto da vazão pela CSS para cada mês. Devido a problemas de incrustação, já mencionados, a *PSS* da bacia RB01 foi calculada apenas para os meses entre abril e novembro. A estimativa da *PSS* na bacia RB01 foi realizada para as duas curvas de ajuste. Na Figura 18 a PSS_1 representa a produção de sedimento para a primeira curva de ajuste (Figura 12 a) e a PSS_2 para a segunda curva ajuste (Figura 12 b). O mês de Julho foi o que apresentou a maior *PSS* na bacia, tanto com o uso do primeiro ($56,1 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$) quanto do segundo ajuste ($53,5 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$). Retirando o mês de novembro, que foi monitorado apenas até o dia 5, o mês de setembro foi o que apresentou menor produção de sedimento, $0,6$ e $0,4 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, para PSS_1 e PSS_2 , respectivamente. Os dois meses com maior *PSS*, junho e julho, foram os que apresentaram maior vazão média, $13,3$ e $8,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e maior precipitação acumulada, $222,7$ e $210,6 \text{ mm}$.

A Figura 19 mostra a estimativa de *PSS*, a precipitação mensal e a vazão média mensal para as bacias RB10 e RB11. A precipitação nessas bacias, gerada através do método de Thiessen, é a mesma, por este motivo os gráficos de precipitação dessas bacias foram agrupados. Na estimativa de *PSS* mensal da Figura 19 deve-se considerar o período em que não houve monitoramento: RB10 (29/06 a 17/07) e RB11 (09/07 a 16/07).

A precipitação mensal para as bacias RB10 e RB11 apresentou resultado semelhante a da bacia RB01. O mês com maior precipitação foi julho, com 226 mm, e agosto foi o mês com menor precipitação, 5,5 mm apenas. Na bacia RB10 o mês com maior vazão média foi julho, com $1,33 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, enquanto na RB11 foi o mês de junho, com $0,42 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Assim como na RB01, na RB10 e RB11 o mês de março foi o que apresentou menor vazão média, $0,11$ e $0,06 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente. A maior *PSS*, para as bacias RB10 e RB 11 aconteceu nos meses de junho e julho, assim como ocorreu na bacia RB01. A menor *PSS* ocorreu no

mês de novembro (monitorado até o dia 5), com $0,04 \text{ t.km}^{-2}$ na RB10 e $0,05 \text{ t.km}^{-2}$ na RB11.

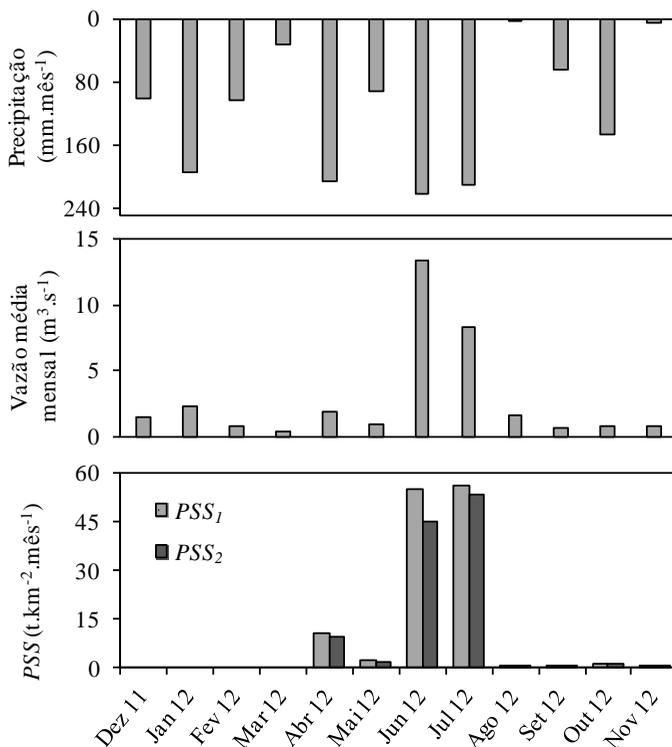


Figura 18 – Precipitação, *PSS* e vazão média mensal para bacia RB01. *PSS*₁ representa a produção de sedimento para a primeira curva de ajuste e *PSS*₂ para segunda curva de ajuste.

Na Figura 19 observa-se que, no mês de julho, a *PSS* foi maior na bacia RB11 do que na RB10. Isto deve ter ocorrido devido a RB10 ter ficado um número maior de dias sem monitoramento neste mês e, neste período em que a RB10 ficou sem monitoramento, houve um evento com grande *PSS* que foi registrado pela RB11.

Ao analisar a estimativa da *PSS* das bacias RB01 (Figura 18), RB10 e RB11 (Figura 19) conclui-se que os meses com maior *PSS* em suspensão foram aqueles que apresentaram maior vazão média e precipitação acumulada, juntos. A precipitação atua diretamente nos processos erosivos, através da desagregação e transporte do sedimento

até os rios, e a vazão (velocidade do fluxo) influencia na capacidade de transporte e remobilização dos sedimentos depositados.

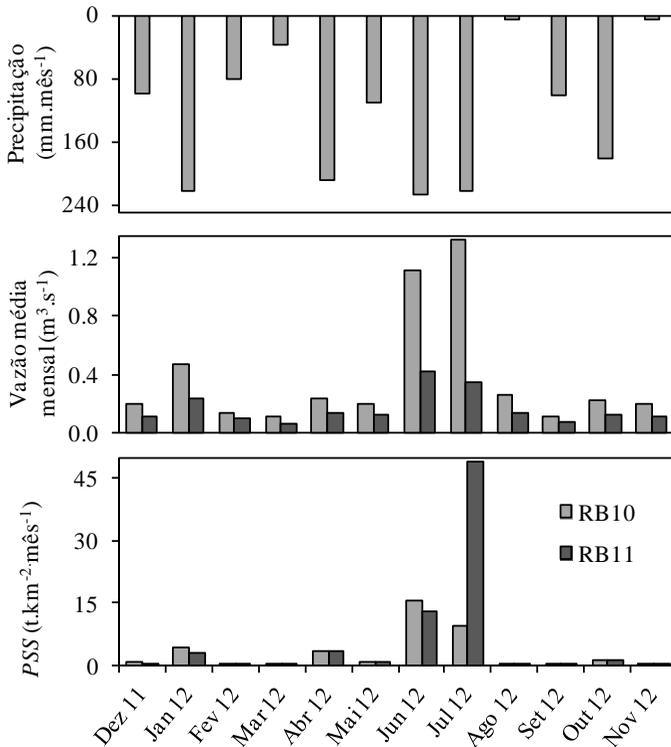


Figura 19 - Estimativa mensal de precipitação e PSS e vazão média mensal para as bacias RB10 e RB11.

4.3 FATORES DE CONTROLE DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO

4.3.1 Identificação e delimitação de eventos

A partir da série com os dados monitorados nas três bacias foi realizada a identificação e a delimitação dos eventos. Para a utilização desses eventos nas análises estatísticas foi realizada uma seleção, com base na confiabilidade dos dados de cada evento. O critério utilizado para exclusão foi baseado na cota de margem plena de cada bacia. Os

eventos selecionados foram aqueles que não ultrapassaram a cota de margem plena. Na bacia RB01 os eventos selecionados foram aqueles que alcançaram até 2,25 m de cota ($33,76 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), na bacia RB10 o limite foi 1,35 m ($4,42 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e na bacia RB11 foi 1,22 m ($2,66 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

4.3.2 Características de chuva, vazão e concentração de sedimentos em suspensão

As características de cada evento selecionado nas bacias RB01, RB10 e RB11, são apresentadas nas respectivas Tabela 5 a), b) e c). As vazões máximas específicas (Q_{me}) estão em $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$, para transformá-las para $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ basta multiplicá-las pela área da bacia, em km^2 , e depois dividir o resultado pelo fator 86,4.

Na bacia RB01 foram utilizados 15 eventos, o primeiro ocorreu dia 28/04/12 e o último no dia 31/10/12. A vazão máxima específica dos eventos (Q_{me}) variou entre 0,8 e $45,4 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$. A CSS máxima (CSS_m) foi feita para as duas curvas de ajuste do sensor, CSS_m média dos eventos foi de 410,3 e $459,2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, para CSS_{m1} e CSS_{m2} . Os valores máximos de CSS_m ocorreram no evento de número 2, alcançaram 840,2 e $998,3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Utilizando a PSS_1 , o valor médio de produção de sedimento por evento foi de $1010,5 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$, com a PSS_2 o valor foi um pouco inferior, $827,2 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$. O evento com maior PSS foi o Evento 1, com 3281,5 e $2784,7 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$ para PSS_1 e PSS_2 , respectivamente.

A Figura 20 mostra o hidrograma e o sedimentograma desse evento. A curva de ajuste CSS_2 apresentou valores de pico maiores que a CSS_1 , todavia a PSS gerada no evento foi maior para a primeira curva, pois a CSS_1 superestima a CSS. A precipitação total que gerou esses eventos (P_{te}) variou de 0,1 a 57,8 mm, tendo este valor máximo ocorrido no mesmo evento que apresentou a CSS máxima (Tabela 5 a).

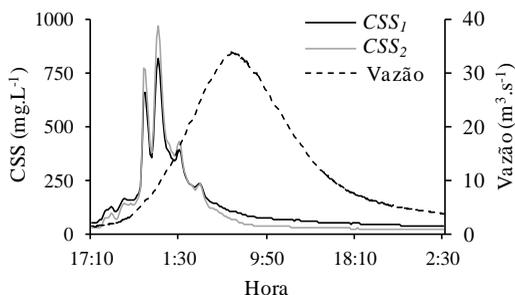


Figura 20 – Evento 1 da bacia RB01, vazão e concentração de sedimentos em suspensão.

A bacia RB10 foi a que contabilizou maior número de eventos (18), que aconteceram entre 22/12/11 e 25/09/12. A vazão máxima específica dos eventos (Qme) variou de 1,7 a 33,6 mm.dia^{-1} . A $CSSm$ média para os eventos foi de 537,3 mg.L^{-1} e a máxima de 2584,4 mg.L^{-1} . A PSS da bacia RB10 registrou um valor médio de 379,9 kg.km^{-2} e máximo de 1308,9 kg.km^{-2} . A Pte dos eventos variou de 2,0 a 53,9 mm. O Evento 8 (Figura 21), que ocorreu no dia 21/01/12, foi o que apresentou maior Qme , $CSSm$ e PSS entre os eventos selecionados (Tabela 5 b).

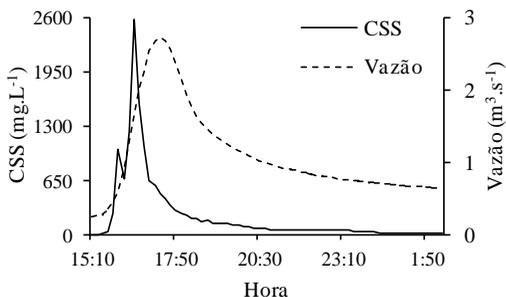


Figura 21 – Evento 8 da Bacia RB10, vazão e concentração de sedimentos em suspensão.

Na bacia RB11 foram selecionados 17 eventos, acontecidos durante o mesmo período da bacia RB10 (entre 22/12/11 e 25/09/12). A Qme mínima e máxima ficaram bem próximas a da bacia RB10, 1,3 e 33,2 mm.dia^{-1} . A $CSSm$ média foi de 131,4 mg.L^{-1} , a mínima e a máxima foram de 19,9 e 335,7 mg.L^{-1} . A maior PSS foi de 779,4 kg.km^{-2} e não ocorreu no mesmo evento em que a máxima $CSSm$ aconteceu. A PSS máxima aconteceu no Evento 12 e a $CSSm$ no Evento 8 (Figura 22). A Pte dos eventos variou de 2,6 a 53,9 mm (Tabela 5 c).

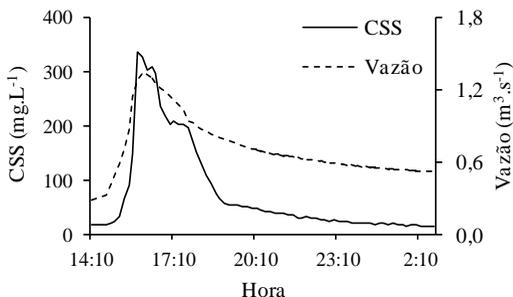


Figura 22 – Evento 8 da Bacia RB11, vazão e concentração de sedimentos em suspensão.

Tabela 5 a) – Características de chuva, vazão e sedimentos em suspensão para os eventos da bacia RB01.

Evento	Data inicio	Condições Pré-evento				Condições do Evento													
		Vazão		Precipitação		<i>t</i>	Precipitação					Vazão				Sedimento			
		<i>Q_a</i>	<i>Q_{a1}</i>	<i>API₅</i>	<i>API₃</i>		<i>Pte</i>	<i>tP</i>	<i>IP</i>	<i>IP₁₀</i>	<i>t_{pico}</i>	<i>TiQ</i>	<i>Q_{me}</i>	<i>Q_{med}</i>	<i>CSS_{m1}</i>	<i>CSS_{m2}</i>	<i>PSS₁</i>	<i>PSS₂</i>	
m ³ .s ⁻¹	m ³ .s ⁻¹	mm	mm	h	mm	h	mm	mm	mm	h	m ³ .s ⁻¹ .h ⁻¹	mm.dia ⁻¹	m ³ .s ⁻¹	mg.L ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.km ⁻²	kg.km ⁻²		
1	28/04/12	1,38	2,02	117,8	111,3	34	45,8	6,2	18,4	5,1	13,3	2,44	45,4	18,1	819	971	3282	2785	
2	24/05/12	0,46	0,46	0,5	0,5	37	57,8	16,3	24,6	2,2	20,7	0,48	13,8	6,1	840	998	1822	1755	
3	31/05/12	0,90	0,90	1,7	1,6	27	5,2	4,7	2,0	1,4	8,3	0,01	1,3	1,3	27	14	24	13	
4	10/06/12	2,26	2,56	4,1	0,2	49	48,7	17,8	4,9	1,0	20,3	1,16	34,5	17,5	414	458	3043	2229	
5	18/06/12	2,78	1,95	9,9	9,3	32	32,3	12,7	17,7	3,0	12,2	1,59	29,8	16,6	373	407	2428	1934	
6	17/07/12	1,50	1,10	19,4	19,2	29	19,2	7,2	4,7	3,1	11,5	0,40	8,1	4,8	813	964	1111	1070	
7	30/07/12	7,34	12,02	98,8	58,8	35	19,1	5,0	3,2	1,9	10,3	1,18	26,3	18,2	244	243	2071	1425	
8	19/09/12	0,48	0,48	1,5	1,2	29	8,9	2,0	2,2	1,2	14,3	0,01	0,8	0,8	117	83	13	8	
9	21/09/12	0,50	0,55	10,3	9,6	30	22,6	7,5	2,4	1,9	11,5	0,05	1,5	1,1	656	766	214	200	
10	26/09/12	0,50	0,48	27,5	5,0	11	0,1	0,2	0,1	0,1	2,8	0,13	1,2	0,9	71	36	11	6	
11	01/10/12	0,46	0,45	3,3	2,9	29	8,5	1,8	3,1	1,4	13,5	0,02	1,0	0,8	108	72	42	22	
12	11/10/12	0,45	0,41	6,5	6,4	36	15,0	9,0	3,6	1,1	17,2	0,02	1,0	0,8	60	30	27	14	
13	23/10/12	1,12	0,42	34,4	34,2	13	22,0	5,7	2,9	2,6	7,2	0,42	5,6	3,6	435	485	318	290	
14	26/10/12	0,94	0,66	68,6	14,5	18	26,9	6,0	7,7	3,2	8,8	0,86	11,5	6,2	694	813	641	570	
15	31/10/12	0,73	0,73	3,9	0,8	29	10,4	3,8	7,5	4,0	11,7	0,05	1,8	1,4	483	547	111	88	

Q_a: Vazão antecedente, *Q_{a1}*: Vazão antecedente de 1 dia, *API₅*: Índice de precipitação antecedente 5 dias, *API₃*: Índice de precipitação antecedente 3 dias, *t*: Duração do evento, *Pte*: Precipitação total, *tP*: Tempo de precipitação, *IP*: Índice de precipitação, *IP₁₀*: Intensidade de precipitação de 10 minutos, *t_{pico}*: Tempo de pico, *TiQ*: Taxa de incremento de vazão, *Q_{me}*: Vazão máxima específica, *Q_{med}*: Vazão média, *CSS_{m1}*: Concentração máxima de sedimento em suspensão para primeira curva de ajuste, *CSS_{m2}*: Concentração máxima de sedimento em suspensão para segunda curva de ajuste, *PSS₁*: Produção de sedimentos em suspensão específica para primeira curva de ajuste, *PSS₂*: Produção de sedimentos em suspensão específica para segunda curva de ajuste.

Tabela 5 b)- Características de chuva, vazão e sedimentos em suspensão para os eventos da bacia RB10.

Evento	Data inicio	Condições Pré-evento				Condições do Evento										
		Vazão		Precipitação		<i>t</i>	Precipitação					Vazão			Sedimento	
		<i>Qa</i> m ³ .s ⁻¹	<i>Qa₁</i> m ³ .s ⁻¹	<i>API₅</i> mm	<i>API₃</i> mm		<i>Pte</i> mm	<i>tP</i> h	<i>IP</i> mm	<i>IP₁₀</i> mm	<i>t_{pico}</i> h	<i>TiQ</i> m ³ .s ⁻¹ .h ⁻¹	<i>Q_{me}</i> mm.dia ⁻¹	<i>Q_{med}</i> m ³ .s ⁻¹	<i>CSS_m</i> mg.L ⁻¹	<i>PSS</i> kg.km ⁻²
1	22/12/11	0,11	0,12	1,0	1,0	13	13,7	0,7	11,7	8,6	3,3	0,12	4,0	2,2	1359	169
2	23/12/11	0,14	0,23	15,0	15,0	17	33,5	2,0	22,1	13,2	2,2	0,27	5,5	2,9	1924	411
3	24/12/11	0,21	0,32	53,1	52,1	30	17,8	2,2	7,1	5,8	6,5	0,04	3,6	2,5	493	92
4	01/01/12	0,27	0,29	20,8	18,3	18	8,9	0,7	7,4	3,8	4,7	0,10	5,6	3,7	245	107
5	06/01/12	0,19	0,20	3,6	3,0	14	3,3	0,2	2,8	2,8	2,8	0,20	5,8	3,3	318	119
6	07/01/12	0,26	0,36	6,6	6,6	9	2,0	0,3	1,5	0,8	2,7	0,03	2,6	2,3	350	43
7	14/01/12	0,47	0,28	21,6	12,5	21	30,7	9,0	16,5	2,0	6,3	0,35	20,3	9,8	936	1057
8	21/01/12	0,26	0,31	10,2	0,0	11	53,9	1,0	23,6	23,4	2,2	1,14	20,6	8,4	2584	1309
9	22/01/12	0,44	0,70	58,4	55,6	21	15,5	1,7	8,1	6,4	5,7	0,17	10,4	6,3	105	213
10	23/01/12	0,63	0,80	77,0	77,0	18	31,5	2,0	23,4	17,0	2,5	0,99	23,5	11,9	615	824
11	09/02/12	0,14	0,16	11,2	9,5	17	2,6	0,7	1,2	1,0	4,8	0,02	1,7	1,3	22	9
12	28/04/12	0,31	0,20	126,8	119,9	18	36,1	5,7	20,8	5,6	5,3	0,78	33,6	13,1	149	720
13	24/05/12	0,11	0,11	0,5	0,5	55	53,6	11,5	28,3	3,6	10,3	0,24	19,8	6,5	161	783
14	10/06/12	0,36	0,37	4,6	0,7	60	17,4	8,0	11,7	1,2	13,5	0,15	18,1	7,7	95	437
15	18/06/12	0,45	0,39	15,5	15,3	27	24,0	9,2	7,4	1,4	7,3	0,25	17,1	8,6	67	291
16	29/07/12	0,80	0,97	104,0	72,2	18	18,6	4,0	13,3	2,6	6,8	0,15	13,8	9,2	42	168
17	21/09/12	0,11	0,11	15,4	15,2	32	3,3	0,3	2,6	2,4	11,2	0,01	1,7	1,2	7	7
18	25/09/12	0,10	0,10	14,3	0,0	11	16,4	0,8	9,3	8,3	3,8	0,18	6,0	2,6	197	80

Qa: Vazão antecedente, *Qa₁*: Vazão antecedente de 1 dia, *API₅*: Índice de precipitação antecedente 5 dias, *API₃*: Índice de precipitação antecedente 3 dias, *t*: Duração do evento, *Pte*: Precipitação total, *tP*: Tempo de precipitação, *IP*: Índice de precipitação, *IP₁₀*: Intensidade de precipitação de 10 minutos, *t_{pico}*: Tempo de pico, *TiQ*: Taxa de incremento de vazão, *Q_{me}*: Vazão máxima específica, *Q_{med}*: Vazão média, *CSS_m*: Concentração máxima de sedimento em suspensão, *PSS*: Produção de sedimentos em suspensão específica.

Tabela 5 c) - Características de chuva, vazão e sedimentos em suspensão para os eventos da bacia RB11.

Evento	Data inicio	Condições Pré-evento				Condições do Evento										
		Vazão		Precipitação		<i>t</i>	Precipitação					Vazão			Sedimento	
		<i>Qa</i>	<i>Qa₁</i>	<i>API₅</i>	<i>API₃</i>		<i>Pte</i>	<i>tP</i>	<i>IP</i>	<i>IP₁₀</i>	<i>t_{pico}</i>	<i>TiQ</i>	<i>Q_{me}</i>	<i>Q_{med}</i>	<i>CSS_m</i>	<i>PSS</i>
m ³ .s ⁻¹	m ³ .s ⁻¹	mm	mm	h	mm	h	mm	mm	mm	h	m ³ .s ⁻¹ .h ⁻¹	mm.dia ⁻¹	m ³ .s ⁻¹	mg.L ⁻¹	kg.km ⁻²	
1	22/12/11	0,08	0,08	1,0	1,0	13	13,7	0,7	11,7	8,6	2,2	0,11	3,8	2,1	250	113
2	23/12/11	0,10	0,13	15,0	15,0	15	33,5	2,0	22,1	13,2	3,8	0,03	2,8	2,0	31	21
3	24/12/11	0,12	0,14	53,1	52,1	18	17,8	2,2	7,1	5,8	6,0	0,02	2,9	2,1	46	33
4	01/01/12	0,14	0,15	20,8	18,3	12	8,9	0,7	7,4	3,8	4,7	0,06	5,4	3,6	77	72
5	06/01/12	0,11	0,12	3,6	3,0	11	3,3	0,2	2,8	2,8	2,5	0,12	5,0	3,3	182	101
6	21/01/12	0,14	0,16	10,2	0,0	9	53,9	1,0	23,6	23,4	1,7	0,29	7,8	4,5	169	103
7	22/01/12	0,19	0,25	58,4	55,6	19	15,5	1,7	8,1	6,4	5,8	0,07	7,1	4,7	161	196
8	23/01/12	0,28	0,35	77,0	77,0	13	31,5	2,0	23,4	17,0	1,8	0,58	16,6	8,9	336	488
9	09/02/12	0,10	0,12	11,2	9,5	13	2,6	0,7	1,2	1,0	3,3	0,02	1,9	1,6	39	14
10	14/04/12	0,06	0,06	3,0	2,5	13	9,4	0,7	9,1	4,3	3,3	0,01	1,3	1,1	46	10
11	28/04/12	0,19	0,11	126,8	119,9	11	36,1	5,7	20,8	5,6	4,8	0,51	33,2	16,1	124	615
12	24/05/12	0,11	0,07	0,5	0,5	17	53,6	11,5	28,3	3,6	5,5	0,30	21,9	11,1	204	779
13	10/06/12	0,23	0,21	4,6	0,7	31	17,4	8,0	11,7	1,2	10,5	0,11	16,7	7,8	107	370
14	18/06/12	0,23	0,19	15,5	15,3	16	24,0	9,2	7,4	1,4	6,0	0,16	14,4	8,1	67	233
15	29/07/12	0,45	0,48	104,0	72,2	12	18,6	4,0	13,3	2,6	3,8	0,12	11,6	8,2	57	123
16	10/09/12	0,07	0,07	1,2	1,2	22	13,1	3,2	3,3	2,4	6,8	0,01	1,5	1,2	20	11
17	25/09/12	0,08	0,06	14,3	0,0	6	16,4	0,8	9,3	8,3	3,8	0,11	6,2	3,4	319	109

Qa: Vazão antecedente, *Qa₁*: Vazão antecedente de 1 dia, *API₅*: Índice de precipitação antecedente 5 dias, *API₃*: Índice de precipitação antecedente 3 dias, *t*: Duração do evento, *Pte*: Precipitação total, *tP*: Tempo de precipitação, *IP*: Índice de precipitação, *IP₁₀*: Intensidade de precipitação de 10 minutos, *t_{pico}*: Tempo de pico, *TiQ*: Taxa de incremento de vazão, *Q_{me}*: Vazão máxima específica, *Q_{med}*: Vazão média, *CSS_m*: Concentração máxima de sedimento em suspensão, *PSS*: Produção de sedimentos em suspensão específica.

4.4 CORRELAÇÕES E MODELO DE REGRESSÃO

4.4.1 Correlações

Os dados de vazão, precipitação e CSS foram normalizados através da transformação log-normal. Na Tabela 6 encontra-se o resumo, para todas as bacias, das correlações da *PSS* com as variáveis independentes geradas pelo coeficiente de correlação de Pearson. A bacia RB01 possui duas colunas \ln_PSS_1 e \ln_PSS_2 , que são os resultados da correlação para as duas curvas de ajuste (Turbidez x CSS) geradas na bacia. As tabelas completas, com os resultados das relações de todas as variáveis, estão no Apêndice B: Tabelas B1 B2 e B3 para bacia RB01 RB10 e RB11, respectivamente.

Na bacia RB01, para todas as correlações e para os dois tipos de ajustes do sensor de turbidez, a variável que se relacionou mais significativamente com a *PSS* foi a \ln_Qme (Tabela 6). As variáveis menos significativas foram \ln_API_3 e t_{pico} . A *PSS* da RB01 apresenta correlações significativas primeiramente com as variáveis ligadas a vazão do evento, depois com as variáveis de precipitação do evento e, por último, com as variáveis de vazão antecedentes ao evento. As variáveis de tempo do evento (t) e precipitação antecedentes não apresentaram correlações significativas. Estes resultados podem demonstrar que a *PSS* da RB01 é diretamente dependente da capacidade de transporte de sedimentos (vazão), ou seja, esse fator é limitante na produção de sedimentos em suspensão da bacia. Além disso, fatores de precipitação antecedentes ao evento possuem pouca influência na *PSS*.

As variáveis independentes com melhor correlação com a *PSS* na bacia RB10 foram \ln_TiQ e \ln_Qme , com coeficientes de 0,93 e 0,90, respectivamente (Tabela 6). A variável menos significativa foi \ln_API_3 . Assim como na bacia RB01, na bacia RB10 as variáveis com maior correlação com *PSS* foram aquelas relacionadas com a vazão do evento e depois as relacionadas à precipitação do evento. As variáveis relacionadas às condições antecedentes, tanto de precipitação quanto de vazão, não foram significativamente relacionadas com a *PSS* do evento. Tais resultados indicam que a *PSS* da bacia RB10, assim como na RB01, possui forte vínculo com as variáveis relacionadas a vazão do evento.

Na bacia RB11 a variável independente mais significativamente relacionada com a *PSS* do evento também foi a \ln_Qme , com coeficiente de 0,96. As menos significativas foram t e \ln_IP_{10} (Tabela 6). A *PSS* da bacia RB11 também se relacionou significativamente, primeiro com variáveis de vazão e, depois, com as variáveis de precipitação do evento.

Entre as variáveis antecedentes apenas a vazão antecedente ao evento (\ln_Qa) foi significativa.

Tabela 6 – Resultados do coeficiente de correlação de Pearson entre a variável dependente ($\ln PSS$) e as variáveis independentes.

Variáveis	RB01		RB10	RB11
	\ln_PSS_1	\ln_PSS_2	\ln_PSS	\ln_PSS
\ln_Qa	0,69	0,60	0,44	0,65
\ln_Qa_1	0,63	0,55	0,30	0,38
\ln_API_5	0,34	0,33	0,05	0,19
\ln_API_3	0,27	0,29	-0,01	0,13
t	0,46	0,42	0,22	0,08
\ln_Pte	0,71	0,72	0,87	0,55
tP	0,66	0,65	0,64	0,61
\ln_IP	0,69	0,66	0,88	0,59
\ln_IP_{10}	0,59	0,60	0,43	0,12
t_{pico}	0,36	0,33	-0,03	0,16
\ln_TiQ	0,90	0,84	0,93	0,94
\ln_Q_{me}	0,95	0,87	0,90	0,96
\ln_Q_{med}	0,94	0,85	0,86	0,94

* Para a bacia RB01 foram geradas duas colunas do coeficiente de correlação de Pearson, uma para a primeira curva de ajuste ($\ln PSS_1$) e outra para a segunda curva de ajuste ($\ln PSS_2$). * Os dados destacados em negrito são aqueles significativos ($p < 0,05$).

As variáveis relacionadas à vazão (\ln_TiQ , \ln_Q_{me} e \ln_Q_{med}), foram as que apresentaram correlação mais significativa com a PSS (\ln_PSS) em todas as bacias. Tais resultados, como já apontado por Duvert et al. (2012) podem indicar que a PSS nessas bacias sofrem influência principalmente das funções de produção e transferência de sedimentos. Em seu trabalho, Duvert et al. (2012) relacionaram a PSS com a vazão máxima do evento e encontraram valores de coeficiente de correlação entre 0,68 e 0,94, parecidos com os encontrados nesse estudo.

As variáveis relacionadas com a precipitação do evento (\ln_Pte , tP e \ln_IP) também apresentaram boas correlações com a PSS do evento em todas as bacias, com coeficientes de correlação variando entre 0,55 e 0,88.

Zabaleta et al. (2007) também encontrou boas correlações entre a precipitação, vazão e PSS para algumas de suas bacias. Conforme os autores, a forte correlação entre estas variáveis sugere que estas bacias apresentam uma resposta direta na vazão e na produção de sedimentos durante eventos de chuva.

4.4.2 Regressão multivariada

Foram selecionadas as mesmas variáveis de entrada no modelo para todas as bacias para realizar a comparação dos resultados do modelo de regressão múltipla entre essas. Dentre as variáveis calculadas para os eventos se observou, através do coeficiente de correlação de Pearson (Tabela 6), que as variáveis relacionadas à vazão do evento foram as que obtiveram melhor correlação com *PSS*, seguidas das variáveis relacionadas à precipitação do evento. Como mostra o Apêndice B (Tabelas B1 B2 e B3) as variáveis relacionadas à vazão (\ln_{TiQ} , \ln_{Qme} e \ln_{Qmed}) possuem forte correlação entre si, assim como as variáveis relacionadas à precipitação (\ln_{Pte} , tP e \ln_{IP}). As variáveis de entrada do modelo não podem ser dependentes entre si, dessa forma foram selecionadas apenas duas variáveis, uma de vazão e outra de precipitação do evento. As duas variáveis de entrada dos modelos escolhidas foram vazão máxima específica (\ln_{Qme}) e precipitação total do evento (\ln_{Pte}). Essas variáveis foram escolhidas, pois foram as que apresentaram melhor correlação com *PSS* considerando as três bacias de estudo.

A aplicabilidade desse modelo se dá apenas para os eventos que não ultrapassaram o limite de vazão de margem plena, visto que os eventos selecionados na criação desses modelos tiveram essa limitação.

RB01

Na bacia RB01 o modelo de regressão múltipla foi criado para as duas curvas de ajuste geradas entre o sensor de turbidez e a CSS. Para diferenciar o modelo gerado para as curvas foi utilizado PSS_1 para o modelo gerado a partir dos resultados da primeira curva de ajuste e PSS_2 para o modelo gerado a partir dos resultados da segunda curva de ajuste.

Para a primeira curva de ajuste da bacia RB01 foi gerado o seguinte modelo de regressão linear multivariada:

$$\ln_{PSS_j} = 1,15 \cdot \ln_{Qme} + 0,32 \cdot \ln_{Pte} + 2,89 \quad (24)$$

Esse modelo apresentou alto coeficiente de determinação, com R^2 ajustado de 0,94. O teste F apresentou valor de 105,64, com valor- $p < 0,05$. Valores elevados do teste F associados a valores baixos de valor- p significam que a hipótese nula pode ser rejeitada e considera-se que as médias são significativamente diferentes, o que representa que o modelo de regressão foi significativo. Os resíduos do modelo apresentaram distribuição normal e não apresentaram correlações com

os valores de PSS observados e calculados. A Tabela 7 apresenta os resultados do modelo de regressão e a Figura 23 os gráficos com os resultados das análises dos resíduos, ambos referentes à primeira curva de ajuste da bacia RB01.

Tabela 7 – Resultados do modelo de regressão para a primeira curva de ajuste da bacia RB01.

		β	eqm(β)	B	eqm(B)	p-level
	Intercepto			2,89	0,27	0,00
PSS_I	\ln_Qme	0,81	0,08	1,15	0,12	0,00
	\ln_Pte	0,24	0,08	0,32	0,11	0,01

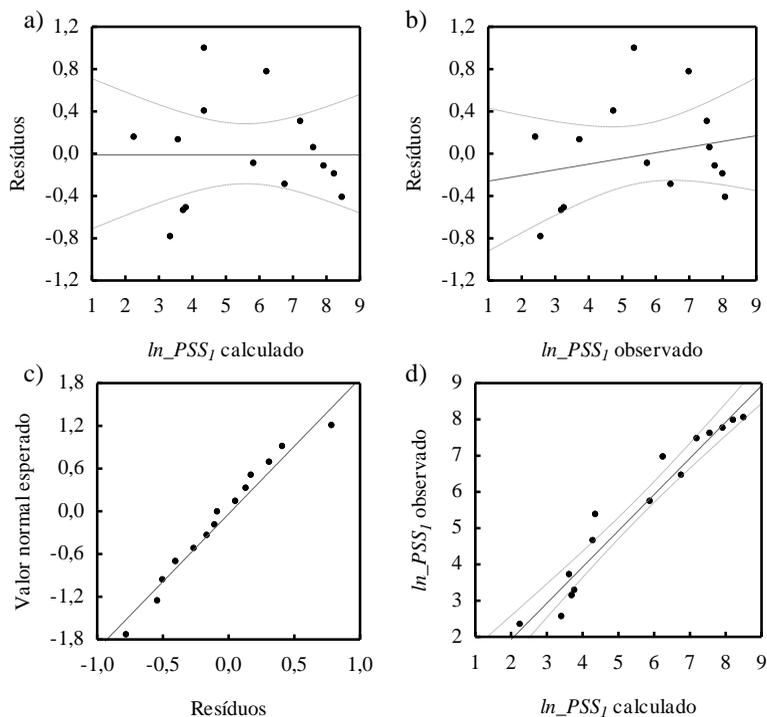


Figura 23 – Resultado das análises dos resíduos do modelo de regressão referentes à primeira curva de ajuste da bacia RB01. a) e b) são os gráficos dos resíduos com os valores de \ln_PSS_I calculados e observados, c) plot normal dos resíduos e d) gráfico entre valores calculados e observados.

A fórmula do modelo de regressão para a segunda curva de ajuste foi:

$$\ln_PSS_2 = 1,08 \cdot \ln_Qme + 0,47 \cdot \ln_Pte + 2,41 \quad (25)$$

O modelo gerado para a segunda curva apresentou coeficiente de determinação, R^2 ajustado, de 0,81. O valor do teste $F=30,24$ com valor- $p < 0,05$. Os resíduos do modelo apresentaram distribuição normal e não apresentaram correlações com os valores de PSS observados e calculados. A Tabela 8 apresenta os resultados do modelo de regressão e a Figura 24 os gráficos com os resultados das análises dos resíduos, ambos referentes à segunda curva de ajuste da bacia RB01.

Tabela 8 – Resultados do modelo de regressão para a segunda curva de ajuste da bacia RB01.

	β	eqm(β)	B	eqm(B)	p-level
Intercepto			2,41	0,52	0,00
PSS_2 \ln_Qme	0,69	0,14	1,08	0,23	0,00
\ln_Pte	0,33	0,14	0,47	0,21	0,04

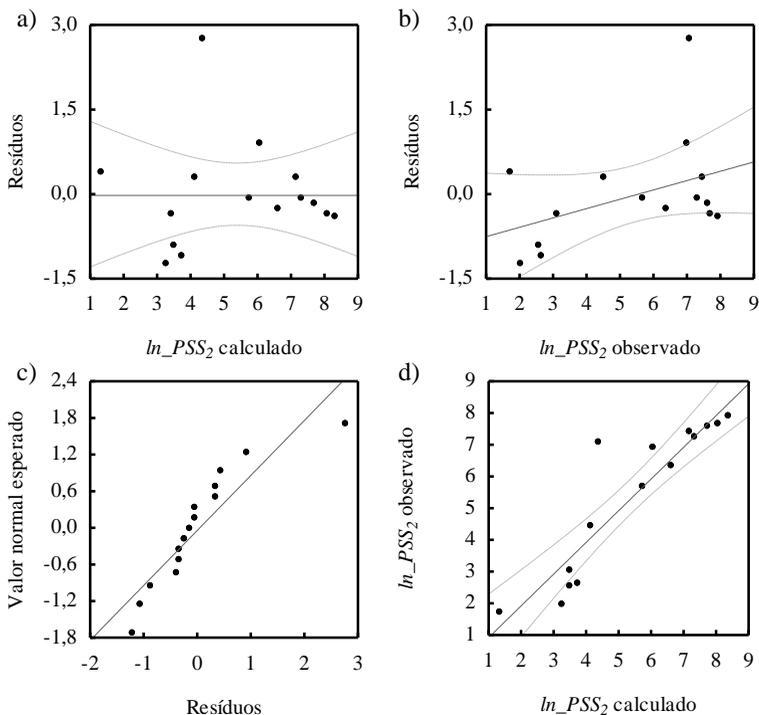


Figura 24 - Resultado das análises dos resíduos do modelo de regressão referentes à segunda curva de ajuste da bacia RB01. a) e b) são os gráficos

dos resíduos com os valores de \ln_PSS_2 calculados e observados, c) plot normal dos resíduos e d) gráfico entre valores calculados e observados.

Comparando o modelo de regressão para as duas curvas de ajuste, se percebe que no modelo da primeira curva (PSS_1) o R^2 ajustado foi maior (0,94) que o da segunda curva de ajuste (PSS_2), que apresentou R^2 ajustado de 0,81. Isso significa que os parâmetros de vazão máxima e precipitação total do evento explicaram 94% da variação percentual na PSS no modelo da primeira curva de ajuste, enquanto que na segunda curva essas mesmas variáveis conseguiram explicar um pouco menos, ou seja, 81% da PSS . As duas curvas de ajuste apresentaram valor- $p < 0,05$, entretanto o valor de F foi maior para a primeira, 105,64 contra 30,24 da segunda curva de ajuste, o que indica que o modelo da primeira curva é mais significativo que o modelo da segunda curva de ajuste.

O coeficiente de regressão, que mede a quantidade de mudança esperada na variável dependente para cada unidade de mudança na variável independente, foi maior para a variável vazão máxima (Qme) do que para precipitação total do evento (Pte), em ambas as curvas. Isso indica que a variável Qme possui maior influência na predição da variável dependente. O coeficiente de regressão da Pte foi de 0,32 para primeira curva de ajuste e 0,47 para segunda curva de ajuste, o que significa que na segunda curva a variação unitária da Pte representa uma variação maior do resultado da variável dependente.

RB10

A equação gerada para a bacia RB10 foi a seguinte:

$$\ln_PSS = 0,93 \cdot \ln_Qme + 0,57 \cdot \ln_Pte + 1,71 \quad (25)$$

Os dados do modelo de regressão da bacia RB10 estão apresentados na Tabela 9. O coeficiente de determinação ajustado foi de 0,85, $F=49,85$ e valor- $p < 0,05$. Os resíduos do modelo apresentaram distribuição normal e não apresentaram correlações com os valores de PSS observados e calculados, Figura 25.

Tabela 9 - Resultados do modelo de regressão para bacia RB10.

	β	eqm(β)	B	eqm(B)	p-level
Intercepto			1,71	0,39	0,00
\ln_Qme	0,59	0,16	0,93	0,25	0,00
\ln_Pte	0,39	0,16	0,57	0,23	0,03

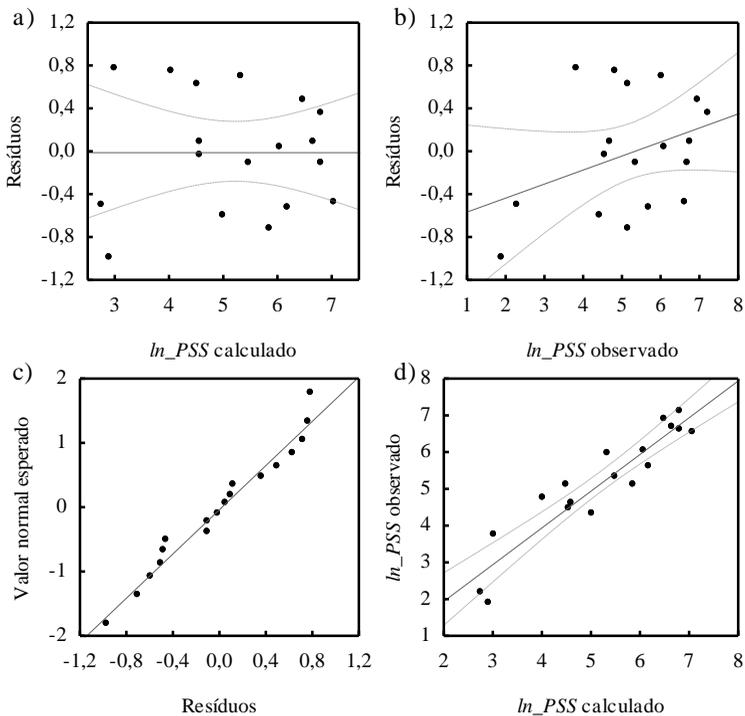


Figura 25 - Resultado das análises dos resíduos do modelo de regressão da bacia RB10. a) e b) são os gráficos dos resíduos com os valores de \ln_PSS calculados e observados, c) plot normal dos resíduos e d) gráfico entre valores calculados e observados.

RB11

Para a bacia RB 11, a equação do modelo de regressão multivariada foi a seguinte:

$$\ln_PSS = 1,42 \cdot \ln_Qme + (-0,07) \cdot \ln_Pte + 2,15 \quad (25)$$

A Tabela 10 mostra a estatística dos resultados do modelo de regressão. No modelo de regressão da bacia RB11 o coeficiente de determinação R^2 ajustado também foi alto, as variáveis independentes explicam uma variação percentual de 91% da PSS . O valor- $p < 0,05$ e $F = 85,96$. Entretanto, para essa bacia, a variável Pte não foi significativa, tendo pouca influência na variação da variável dependente PSS , como mostra a Tabela 10.

Os resíduos tiveram distribuição normal e não apresentaram correlação com as variáveis do modelo de regressão (Figura 26).

Tabela 10 - Resultados do modelo de regressão para RB11.

	β	eqm (β)	B	eqm (B)	p-level
Intercepto			2,15	0,35	0,00
\ln_Qme	0,99	0,09	1,42	0,13	0,00
\ln_Pte	-0,04	0,09	-0,07	0,15	0,63

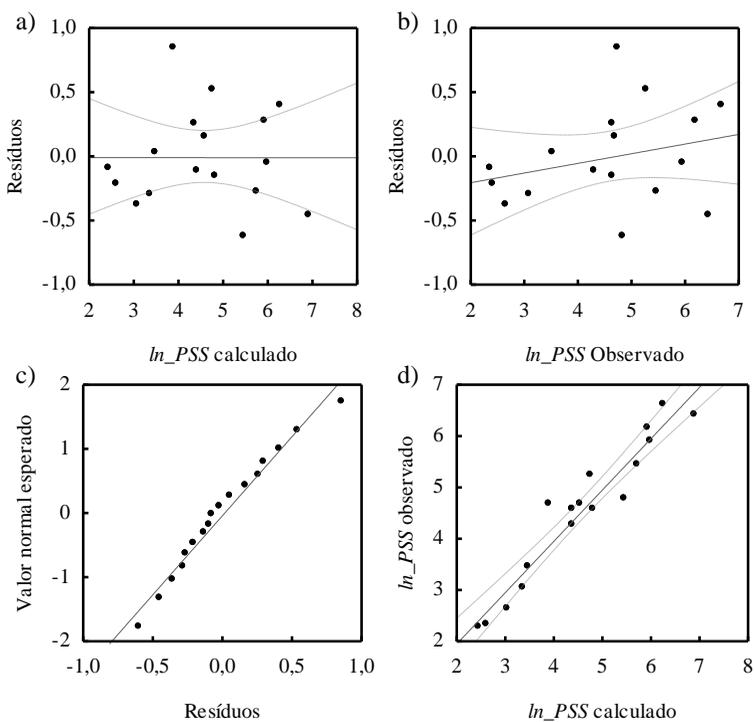


Figura 26 - Resultado das análises dos resíduos do modelo de regressão da bacia RB11. a) e b) são os gráficos dos resíduos com os valores de \ln_PSS calculados e observados, c) plot normal dos resíduos e d) gráfico entre valores calculados e observados.

4.4.3 Relação entre Produção de Sedimentos em Suspensão e Vazão Máxima

A análise da relação entre a *PSS* e a *Qme* dos eventos foi realizada de forma comparativa entre as bacias. Conforme comentado anteriormente, vários estudos já relataram a forte correlação existente entre estas variáveis. Duvert et al. (2010) propuseram que a vazão máxima do evento (ou vazão de pico) pode ser um bom indicador da produção de sedimento em pequenas bacias hidrográficas montanhosas, como é o caso deste estudo.

Para realizar a comparação entre a relação (*PSS* e *Qme*) nas bacias de estudo, foram utilizadas as variáveis específicas, ou seja, divididas pela área de cada bacia. Na regressão linear os interceptos foram forçados a passar pelo zero no eixo y, para que fosse possível comparar individualmente o coeficiente de regressão entre as bacias. A Tabela 11 apresenta alguns resultados das análises de regressão linear entre *PSS* e *Qme* para as bacias e a Figura 27 apresenta os gráficos *scatterplot* dessas relações.

Tabela 11 – Resultados da regressão linear entre *PSS* e *Qme* para todas as bacias.

Bacia	β	R ² ajustado	Erro Padrão da Estimativa
RB01	64,63	0,94	292,36
RB10	32,50	0,80	242,64
RB11	22,40	0,89	98,63

Na Tabela 11 os coeficientes de regressão (β) aumentam da bacia menor (RB11) para a bacia maior (RB01). Sendo o β da RB10 um pouco maior que o β da RB11 e o β da RB01 o dobro do β da RB10. Isso significa que uma mudança unitária na *Qme* é mais significativa na bacia maior que na bacia menor. Assim, para uma mesma *Qme* nas bacias, a *PSS* será maior na bacia RB01, menor na bacia RB10 e menor ainda na bacia RB11.

O erro médio da estimativa aumentou da bacia menor para maior, de 98,63 na RB11 para 292,36 na RB01. O erro padrão da estimativa mede a variabilidade da distribuição condicional de Y para valores fixos de X. Segundo Duvert et al. (2012) essa maior variabilidade na estimativa em bacias maiores pode ser explicada pelo “efeito de memória de curta duração” que ocorre entre eventos sucessivos, isto é, o armazenamento temporário e remobilização dos sedimentos no canal. Como em bacias maiores a possibilidade de deposição do sedimento ao

longo do canal é maior, também é mais provável que o “efeito de memória de curta duração” tenha mais influência em bacias maiores. Assim, esse efeito de memória poderia estar causando esse aumento no erro padrão da estimativa.

Os coeficientes de determinação, R^2 ajustado, foram semelhantes para as bacias RB01 e RB11 (0,94 e 0,89, respectivamente), sendo um pouco menor para a bacia RB10 (0,80). Esses resultados demonstram a boa relação existente entre essas variáveis para essas bacias e confirmam a afirmação de Duvert et al. (2010) de que a Q_{me} pode ser uma boa indicadora da PSS em pequenas bacias.

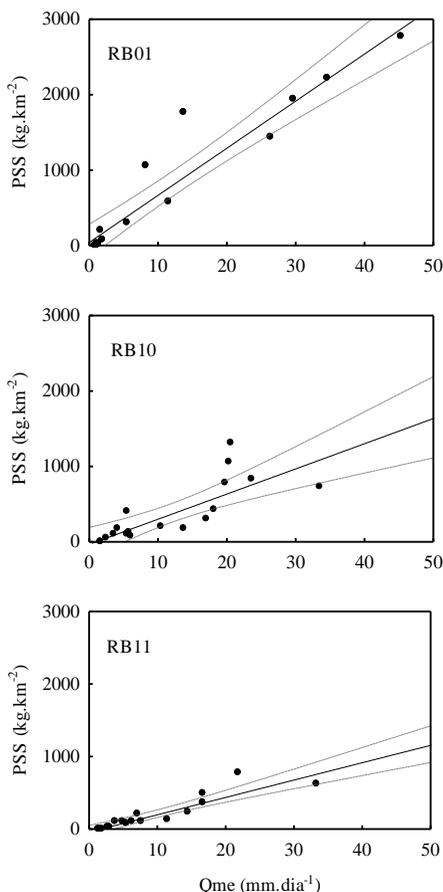


Figura 27 – Regressão entre Produção de Sedimento em Suspensão (PSS) e Vazão Máxima (Q_{me}) em eventos, para todas as bacias.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este estudo analisou as relações entre vazão, precipitação e sedimentos em suspensão na Bacia Hidrográfica do Rio dos Bugres (RB01) e duas outras bacias embutidas a esta (RB10 e RB11). Essas análises foram feitas a partir dos dados do monitoramento realizado no exutório das bacias

A estimativa mensal de produção de sedimentos em suspensão mostrou que, durante o período monitorado, e em todas as bacias, a maior *PSS* ocorreu nos meses de junho e julho. Esses meses foram aqueles que apresentaram maior vazão média e precipitação acumulada.

A partir da série de dados foram delimitados eventos de precipitação para cada bacia. Eventos que ultrapassaram a cota de margem plena foram excluídos. Na RB01 foram selecionados 15 eventos, na RB10 18 eventos e na RB11 17 eventos. Para cada evento foram retirados dados de vazão, precipitação e sedimentos em suspensão do evento e também das condições iniciais desse evento. Na bacia RB01 esses eventos selecionados apresentaram média da *PSS* de 1010,5 kg.km⁻², com o uso da primeira curva de ajuste e 827,2 kg.km⁻² com o uso da segunda curva. Nas bacias RB10 e RB11 a média de *PSS* para os eventos selecionados foi de 379,9 kg.km⁻² e 199,6 kg.km⁻².

Foram realizadas análises de correlação, através do coeficiente de correlação linear de Pearson, entre as variáveis independentes e a *PSS* dos eventos. Antes de serem realizadas as análises de correlação, os dados de vazão, precipitação e *CSS* foram transformados em log-normal para que fossem normalizados. As variáveis relacionadas à vazão (*TiQ*, *Qme* e *Qmed*), foram as que apresentaram correlação mais significativa com a *PSS* em todas as bacias, com coeficientes variando de 0,84 à 0,96.

Para realizar a comparação dos resultados do modelo de regressão múltipla entre as bacias, foram selecionadas as mesmas variáveis de entrada no modelo para todas as bacias, *Pte* e *Qme*

Na bacia RB01 foi gerado um modelo de regressão para cada uma das duas curvas de ajuste, denominados *PSS₁* e *PSS₂*. O modelo gerado para a primeira ajuste apresentou R² ajustado de 0,94 enquanto no modelo da segunda curva o R² ajustado foi de 0,81, com as seguintes equações:

$$\ln_PSS_1 = 1,15 \cdot \ln_Qme + 0,32 \cdot \ln_Pte + 2,89$$

$$\ln_PSS_2 = 1,08 \cdot \ln_Qme + 0,47 \cdot \ln_Pte + 2,41$$

As duas curvas de ajuste da bacia RB01 apresentaram valor- $p < 0,05$, entretanto o valor de F foi maior para a primeira, 105,64 contra 30,24 da segunda curva de ajuste, o que indica que o modelo da primeira curva é mais significativo que o modelo da segunda curva de ajuste.

Na RB10 o modelo apresentou coeficiente de determinação ajustado de 0,85, ficando a equação da seguinte maneira:

$$\ln_PSS = 0,93 \cdot \ln_Qme + 0,57 \cdot \ln_Pte + 1,71$$

Para a bacia RB11 a equação do modelo de regressão apresentou R^2 ajustado de 0,91, resultando na equação a seguir:

$$\ln_PSS = 1,42 \cdot \ln_Qme + (-0,07) \ln_Pte + 2,15$$

Para todas as bacias as análises dos resíduos demonstraram que eles tiveram distribuição normal e não apresentaram correlação com as variáveis do modelo de regressão. a aplicabilidade desses modelos de regressão se dá apenas para eventos semelhantes aos que foram utilizados como dados de entrada do modelo. Isso significa que esses modelos são aplicáveis à apenas aqueles eventos que não ultrapassaram a margem plena na seção de monitoramento.

Uma análise da relação entre a PSS e a Qme dos eventos foi realizada de forma comparativa entre as bacias. O coeficiente de regressão (β) foi avaliado e observou-se que esse coeficiente aumentou da bacia menor (RB11) para a maior (RB01). Assim, uma mudança unitária na Qme é mais significativa na bacia maior que na bacia menor. O erro padrão da estimativa também aumentou com o aumento da área das bacias, ou seja, o erro na variabilidade da estimativa foi maior para bacia RB01. Os coeficientes de determinação, R^2 ajustados, foram 0,94, 0,89 e 0,80 para RB01, RB10 e RB11, respectivamente. Tais resultados mostram a boa relação existente entre essas variáveis, confirmando a Qme como uma boa indicadora da PSS em pequenas bacias.

A relação entre turbidez e CSS sofre influencia de diversos fatores no decorrer do tempo. A continuidade do monitoramento e da realização de coletas de sedimentos em suspensão, principalmente durante eventos, é indispensável para o aprimoramento dessa relação e a aquisição de dados confiáveis. Esse procedimento é importante tanto para estimar a PSS quanto para validar o modelo de regressão para eventos com PSS maiores do que aqueles estudados nesse trabalho.

O monitoramento do sedimento de arrasto, não realizado neste estudo, também pode contribuir para o entendimento dos processos hidrossedimentológicos na bacia. Apesar de ser complicada a realização

da coleta desse tipo de sedimento, a estimativa do volume total de sedimento transportado por arrasto é importante para quantificação do sedimento total transportado.

Como observado nesse trabalho, além da vazão máxima Q_{me} , a TiQ também apresentou boas correlações com a PSS das bacias. Assim, para verificar a validade dessa correlação também em outros lugares, indica-se a aplicação dessa variável em outras bacias.

A utilização da técnica de traçadores pode contribuir com o entendimento dos processos hidrossedimentológicos na BHRB, auxiliando na localização das principais fontes de sedimento na bacia. Tais informações podem ser cruzadas com as informações já existentes para verificar as causas da variabilidade na PSS entre as bacias, além de outros usos.

REFERÊNCIAS

- ABRAHAMS, A. D.; PARSONS, A. J.; LUK, S. Hydrologic and sediment responses to simulated rainfall on desert hillslopes in southern Arizona. *Catena*, v. 15, n. 2, p. 103-117, 1988.
- ASSELMAN, N. E. M. Suspended sediment dynamics in a large drainage basin: the River Rhine Abstract: v. 1450, p. 1437-1450, 1999.
- BELLINASSO, T. B.; PAIVA, J. B.D. de; Avaliação da produção de sedimentos em eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica semi-urbana de encosta. In: **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 12 n.4, p.169-181, 2007.
- BIRKINSHAW, S. J.; BATHURST, J. C. Model study of the relationship between sediment yield and river basin area. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 31, n. 6, p. 750-761, 2006.
- BLÖSCHL, G.; SIVAPALAN, M. Scale issues in hydrological modelling: a review. v. 9. **Hydrological Processes**, p. 251-290, 1995.
- BRASINGTON, J.; RICHARDS, K. Turbidity and suspended sediment dynamics in small catchments in the Nepal Middle Hills. n. February. **Hydrological Processes**, p. 1448-1463, 2000.
- BRONSDON, R.; NADEN, P. Suspended sediment in the Rivers Tweed and Teviot. **The Science of the total environment**, v. 251-252, p. 95-113, 2000.
- BUTZER, K. W. Book reviews: Chorley, R.J., Schumm, S.A. and Sugden, D.E. 1984: *Geomorphology*. London: Methuen. xviii + 605 pp. 17.95. **Progress in Physical Geography**, v. 10, n. 2, p. 292-293, 1984.
- CARVALHO, N. O. *Hidrossedimentologia prática*. Rio de Janeiro: CPRM, 1994. 372 p.
- CÓRDOVA, J. R.; GONZALEZ, M. Sediment yield estimation in small watersheds based on streamflow and suspended sediment discharge measurements. **Soil technology**, v. 11, p. 57-65, 1997.
- CERDÀ, A.; BRAZIER, R.; NEARING, M.; VENTE, J. Scales and erosion. **Catena**, p. 9-10, 2011.
- CHELLA, M. R.; FERNANDES, C. V. S.; FERMIANO, G. A.; FILL, H. D. Rede de monitoramento do Alto Iguaçu: instrumento para definição de metas progressivas para enquadramento. In: **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. João Pessoa, 2005

- CHEITRI, R.; BOWONDER, B. Siltation in Nizamsagar management issues reservoir: environmental. **Applied Geography**, p. 193-204, 1983.
- CRAWFORD, C. G. Estimation of suspended-sediment rating curves and mean suspended-sediment loads. **Journal of Hydrology**, v. 129, n. 1-4, p. 331-348, 1991.
- CHISTOFOLETTI, A.- **Geomorfologia Fluvial**. São Paulo:Edgard Blucher, 1981.
- DUNNE, T. Sediment yield and land use in tropical catchments. *Journal of Hidrology*, v. 42, p. 281-300, 1979.
- DEPINE, H. ; PINHEIRO, A. ; KAUFMANN, V. ; SILVA, M. R. . Transporte de sedimentos em suspensão em áreas agrícolas em diferentes escalas espaciais.. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, p. 97-104, 2011.
- De BOER DH, CAMPBELL IA. Spatial scale dependence of sediment dynamics in a semi-arid badland drainage basin. **Catena** 16: 277–290, 1989.
- VENTE, J.; POESEN, J. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models. **Earth-Science Reviews**, v. 71, n. 1-2, p. 95-125, 2005.
- DUVERT, C.; GRATIOT, N.; EVRARD, O.; NAVRATIL, O.; NÉMERY, J.; PRAT, C; ESTEVES, M. Drivers of erosion and suspended sediment transport in three headwater catchments of the Mexican Central Highlands. **Geomorphology**, v. 123, n. 3-4, p. 243-256, 2010.
- DUVERT, C.; NORD, G.; GRATIOT, N.; NAVRATIL, O.; NADAL-ROMERO, E.; MATHYS, N.; NÉMERY, J.; REGUES, D.; GARCIA_RUIZ, J. M.; GALLART, F.; ESTEVES, M. Towards prediction of suspended sediment yield from peak discharge in small erodible mountainous catchments (0.45–22km²) of France, Mexico and Spain. **Journal of Hydrology**, v. 454-455, p. 42-55, 2012.
- EPAGRI, Empresa de Pesquisa Agropecuária e de Extensão Rural de Santa Catarina. Zoneamento Agroecológico e Socioeconômico do Estado de Santa Catarina. Disponível em: <http://ciramepagris.gov.br> Acesso em 22/03/2013.
- EKERN, P.C. Turbidity and sediment-rating curves for streams on Oahu, Hawaii. In: Foster, G.R., ed. Soil erosion: prediction and control: Proceedings of a national conference on soil erosion; 1976 May 24-26; West Lafayette, IN. Spec. Publ. 21. Ankeny, IA: **Soil Conservation Society of America**: 242-254, 1977.

- FINLAYSON, B. L. Field calibration of a recording turbidity meter. **Catena**, v. 12, n. 2-3, p. 141-147, 1985.
- GAO, P. Understanding watershed suspended sediment transport. **Progress in Physical Geography**, v. 32, n. 3, p. 243-263, 2008.
- GAO, P.; JOSEFSON, M. Temporal variations of suspended sediment transport in Oneida Creek watershed, central New York. **Journal of Hydrology**, v. 426-427, p. 17-27, 2012.
- GIGLIO, J. N.; KOBIYAMA, M. Uso de registros históricos para análise de inundações: estudo de caso do município de Rio Negrinho. In **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos** (2011:Maceió) Maceió: ABRH, Anais, 17p., 2011.
- GIPPEL, C.J. Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams. **Hydrological Processes** 9, 83-97, 1995.
- GOODWIN, T.; YOUNG, A. R.; HOLMES, M. G. R.; OLD, G. H.; LEEKS, J.L.; PACKMAN, J. C.; SMITH, P. G.. The temporal and spatial variability of sediment transport and yields within the Bradford Beck catchment, West Yorkshire. **The Science of The Total Environment**, v. 314-316, p. 475-494, 2003.
- GRANDO, A.; MACIEL, C. B.; KOBIYAMA, M.; RIBAS, JR. U.; LANGA, R. Avaliação da perda de solos na área de reflorestamento de Pinus taeda com modelo RUSLE: Estudo de caso de Rio Negrinho/SC. In: **VIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos** (2008: Campo Grande) Campo Grande: UFMS, Anais, 2008.
- GRANDO, A. **Monitoramento e modelagem hidrossedimentológica em uma microbacia hidrográfica experimental**. Florianópolis: UFSC/CTC/ECV. 175f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.
- GRAY, J. R.; GARTNER, J. W. Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring. **Water Resources Research**, v. 45, n. November 2008, p. W00D29, 2009.
- GRIEBELER, N.P. **Modelo para o dimensionamento de redes de drenagem e de bacias de acumulação de água em estradas não pavimentadas**. Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa, 2002.
- GUY, H. P. "Fluvial Sediment Concepts". In: Applications of hydraulics. USGS. Techniques of Water Resources **Investigations of the United States Geological Survey** . TWRI 3 - C1. Arlington. VA. 55p, 1970.

- HASSAN, M. A.; CHURCH, M.; YAN, Y.; SLAYMAKER, O. Spatial and temporal variation of in-reach suspended sediment dynamics along the mainstem of Changjiang (Yangtze River), China. **Water Resources Research**, v. 46, n. 11, p. W11551, 2010.
- HSU, P.; CHEN, C.; TASI, C. Real-time prediction of the peak suspended sediment concentration and sediment yield of the Lao-Nung River during storms. **International Journal of Sediment Research**, v. 26, n. 2, p. 163-180, 2012.
- JIONGXIN, X.; YUNXIA, Y. Scale effects on specific sediment yield in the Yellow River basin and geomorphological explanations. **Journal of Hydrology**, v. 307, n. 1-4, p. 219-232, 2005.
- JORDÁN-LÓPEZ, A.; MARTÍNEZ-ZAVALA, L.; BELLINFANTE, N. Impact of different parts of unpaved forest roads on runoff and sediment yield in a Mediterranean area. **The Science of the total environment**, v. 407, n. 2, p. 937-44, 2009.
- KANG, S.; ZHANG, L.; SONG, X.; ZHANG, S.; LIU, X.; LIANG, Y.; ZHENG, S. Runoff and sediment loss responses to rainfall and land use in two agricultural catchments on the Loess Plateau of China. **Hydrological Processes**, v. 15, n. 6, p. 977-988, 2001.
- KATTAN, Z.; GAC, J. Y.; PROBST, J. L. Suspended Sediment Load and Mechanical Erosion in the Senegal Basin - Estimation of the Surface Runoff Concentration and Relative Contributions of Channel and Slope Erosion. **Journal of Hydrology**, v. 92, n. 1-2, p. 59-76, 1987.
- KLEMES, V.I.T.. Conceptualization and scale in hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 65, 1983.
- KOBIYAMA, M.; BORTOLOTTTO, N.L.; GAVA, T.; MARCHI, E.C. Geometria na junção fluvial: estudo de caso das bacias do rio Negrinho e rio Cunha, Santa Catarina. **Revista de Geografia**, Recife, v.27, n.2, p.199-209, 2010.
- KUAI, K. Z.; TSAI, C. W. Identification of varying time scales in sediment transport using the Hilbert–Huang Transform method. **Journal of Hydrology**, v. 420-421, p. 245-254, 2012.
- LEFRANÇOIS, J.; GRIMALDI, C.; GASCUEL-ODOUX, C.; GILLIET, N. Suspended sediment and discharge relationships to identify bank degradation as a main sediment source on small agricultural catchments. **Hydrological Processes**, v.21, p.2923-2933, 2007.
- LEWIS, J. Turbidity-controlled suspended sediment sampling and. **Water Resources Research**, v. 32, n. 7, p. 2299-2310, 1996.

- LINO, J.F.L. **Análise da dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do Rio Preto (SC) com o modelo SWAT**. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- LOPES, N.H.Y. **Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT**. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- LOUGHRAN, R.J., Campbell, B.L., Elliot, G.L. Sediment dynamics in a partially cultivated catchment in New South Wales, **Australia. J. Hydrol.** 83, 285–297, 1986.
- MALUTTA, S. **Estudo Hidrossedimentológico da bacia hidrográfica do Rio Negrinho - SC com modelo SWAT**. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.
- MARTTILA, H.; KLOVE, B. Dynamics of erosion and suspended sediment transport from drained peatland forestry. **Journal of Hydrology**, v. 388, n. 3-4, p. 414-425, 2010.
- MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G.; REICHERT, J. M.; ROLOFF, O.; ABREU, A. S. Turbidimetria e a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão. In: IDE, C. N.; VAL, L. A. A.; RIBEIRO, M. L.(Organizadores) **Produção de sedimentos e seus impactos ambientais, sociais e econômicos**. Campo Grande, Ed. Oeste, 2009.
- MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Monitoramento de bacias hidrográficas para identificar fontes de sedimentos em suspensão. **Ciência Rural**, v. 41, n. 3, 2011.
- MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**, John Wiley & Sons, Inc., Third Edition, 506-563, 2003.
- MOTHA, J. A. Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in southeastern Australia. **Water Resources Research**, v. 39, n. 3, p. 1056, 2001.
- NADAL-ROMERO, E.; REGÜÉS, D.; LATRON, J. Relationships among rainfall, runoff, and suspended sediment in a small catchment with badlands. **Catena**, v. 74, n. 2, p. 127-136, 2008.

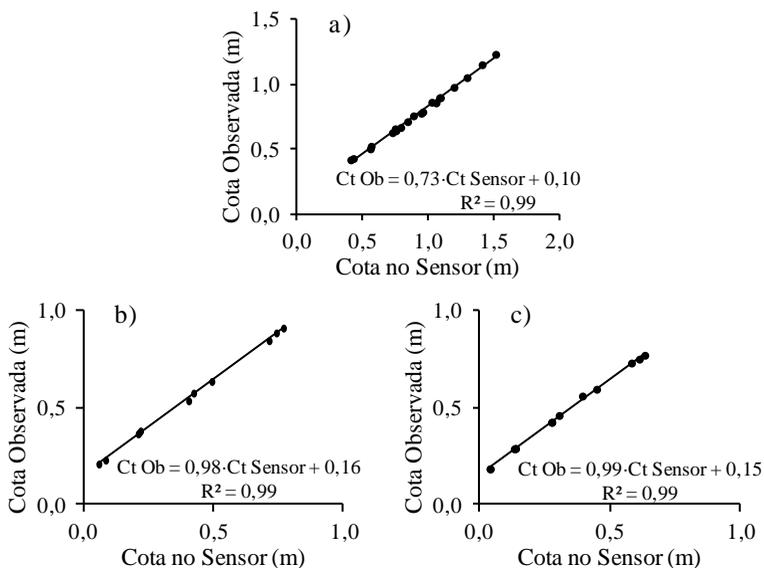
- NAGHETTINI, M; PINTO, E. J. de A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 561 p.
- NAVRATIL, O.; ESTEVES, M. LEGOUT, C. GRTIOT, N.; NEMERY, J.; WILLMORE, S.; GRANGEON, T. Global uncertainty analysis of suspended sediment monitoring using turbidimeter in a small mountainous river catchment. **Journal of Hydrology**, v. 398, n. 3-4, p. 246-259, 2011.
- NU-FANG, F., ZHI-HUA, S.; LU, L.; CHENG, J. Rainfall, runoff, and suspended sediment delivery relationships in a small agricultural watershed of the Three Gorges area, China. **Geomorphology**, v. 135, n. 1-2, p. 158-166, 2011.
- OLD GH.; LEEKS, G. J. L.; PACKMAN, J. C.; SMITH, B. P. G.; LEWIS, S. HEWITT, E. J.; HOLMES, M.; YOUNG, A. The impact of a convectional summer rainfall event on river flow and fine sediment transport in a highly urbanised catchment: Bradford, West Yorkshire. **Sci. Total Environ** 314–316:495–512, 2003.
- OSTERKAMP, W.R., Toy, T.J. Geomorphic considerations for erosion prediction. **Environmental Geology** 29 (3/4), 152–157, 1997.
- OWENS, P.; SLAYMAKER, O. Late Holocene sediment yields in small alpine and subalpine drainage basins , British Columbia. **Erosion, Debris flows and Environment in Mountain Regions**. n. 209, p. 147-154, 1992.
- PARANHOS, R. M.; PAIVA, J. B. DE. Hydro-sedimentological monitoring in a small watershed: instrumentation and results. In: **VII IAHS Scientific Assembly, Foz do Iguaçu**. April, p. 4-9, 2005.
- PARSONS, A. J.; BRAZIER, R. E.; WAINWRIGHT, J.; POWELL, D. M. Scale relationships in hillslope runoff and erosion. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 1393, p. 1384-1393, 2006.
- POESEN, J., VANDAELE, K., van WESEMAEL, B., 1996. Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands. In: Walling, D.E., Webb, B.W. (Eds.), **Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. IAHS Symposium**, vol. 236, pp. 251 – 266.
- RANKL, B. J. G.; NORTON, G. A.; SURVEY, U. S. G. Relations Between Total-Sediment Load and Peak Discharge for Rainstorm Runoff on Five Ephemeral Streams in Wyoming U . S . Department of the Interior. **Water Resources Investigations Report** 02-4150, US Geological Survey, Reston, Virginia, 2004
- RESTREPO, J. D.; KJERFVE, B.; HERMELIN, M.; RESTREPO, J. Factors controlling sediment yield in a major South American

- drainage basin: the Magdalena River, Colombia. **Journal of Hydrology**, v. 316, n. 1-4, p. 213-232, 2006.
- RUSTOMJI, P.; WILKINSON, S. N. Applying bootstrap resampling to quantify uncertainty in fluvial suspended sediment loads estimated using rating curves. **Water Resources Research**, v. 44, n. 9, p. W09435, 25 2008.
- SANTA CATARINA. **Atlas de Santa Catarina**. Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral. Subchefia de Estatística, Geografia e Informática. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 1986.
- SCAPIN, J.; PAIVA, J. B. D.; BELING, F. A. Avaliação de Métodos de Cálculo do Transporte de Sedimentos em um Pequeno Rio Urbano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 4, p. 5-21, 2007.
- SCHOELLHAMER, D. H. Variability of suspended-sediment concentration at tidal to annual time scales in San Francisco Bay, USA. **Continental Shelf Research**, v. 22, n. 11-13, p. 1857-1866, 2002.
- SEEGER, M.; ERREA, M. P.; BEGUERÍA, S.; ARNÁEZ, J.; MARTÍ, C.; GARCÍA-RUIZ, J. M. Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish pyrenees. **Journal of Hydrology**, v. 288, n. 3-4, p. 299-311, 2004.
- SIEGEL, S., & CASTELLAN, N.J. **Nonparametric statistics for the behavioral sciences** (2nded.). New York, NY: McGraw-Hill, 1988.
- SINGER, M. B.; DUNNE, T. Identifying eroding and depositional reaches of valley by analysis of suspended sediment Transport in the Sacramento River, California. **Water Resources Research**, v. 37, n. 12, p. 3371, 2001.
- SINGH, V. P. On application of the Weibull distribution in hydrology. **Water Resources Management**, v. 1, n. 1, p. 33-43, 1987.
- SMITH, B.; NADEN, P. S.; LEEKS, G. J. L.; WASS, P. D. The influence of storm events on fine sediment transport, erosion and deposition within a reach of the River Swale, Yorkshire, UK. **The Science of The Total Environment**, v. 314-316, p. 451-474, 2003.
- SOLER, M.; LATRON, J.; GALLART, F. Relationships between suspended sediment concentrations and discharge in two small research basins in a mountainous Mediterranean area (Vallcebre, Eastern Pyrenees). **Geomorphology**, v. 98, n. 1-2, p. 143-152, 2008.

- STATSOFT, Inc. **Statistica** (*software de análise de dados*). v 8.0. Tulsa, USA, 2007.
- STEDINGER, J. R. Fitting log normal distributions to hydrologic data. **Water Resources Research**, 16(3), 481–490, 1980.
- SUN, H.; CORNISH, P. S.; DANIELL, T. M. Turbidity-based erosion estimation in a catchment in South Australia. **Journal of Hydrology**, v. 253, n. 1-4, p. 227-238, 2001.
- SYVITSKI, J. P.; PECKHAM, S. D.; HILBERMAN, R.; MULDER, T. Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: a planetary perspective. **Sedimentary Geology**, v. 162, n. 1-2, p. 5-24, 2003.
- WALLING, D. E. Assessing the accuracy of suspended sediment rating curves for a small basin. **Water Resources Research**. 13 (3), 531-538, 1977.
- WALLING, D. E. Erosion and sediment yield research -- some recent perspectives **Journal of Hydrology**. v. 100, p. 113-141, 1988.
- WALLING, D. E. Linking land use , erosion and sediment yields in river basins. **Hydrobiologia**, p. 223-240, 1999.
- WALLING, D.E. The sediment delivery problem. **Journal of Hydrology**. 69, 209-237, 1983.
- WALLING, D. E; Webb, B. W. Solutes in river systems, in Trudgill, S. T. (Ed.), **Solute Processes**. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 251±327, 1986..
- WALLING, D. E.; FANG, D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. **Global and Planetary Change**, v. 39, n. 1-2, p. 111-126, 2003.
- WILLIAMS, G. P. Sediment Concentration Versus Water Discharge during Single Hydrologic Events in Rivers. **Journal of Hydrology**, v. 111, n. 1-4, p. 89-106, 1989.
- WOLMAN MG, MILLER JP. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. **Journal of Geology** 68: 54–74, 1961.
- XIAOQING, B. Y. **World meteorological organization operational hydrology report no . 47 manual on sediment management and measurement**. Secretariat of the World Meteorological Organization – Geneva – Switzerland, 2003.
- ZABALETA, A.; MARTÍNEZ, M.; URIARTE, J. A.; ANTIGÜEDAD, I. Factors controlling suspended sediment yield during runoff events in small headwater catchments of the Basque Country. **Catena**, v. 71, n. 1, p. 179-190, 2007.

APÊNDICE A – Curva de calibração dos sensores de nível

As figuras a), b) e c) abaixo apresentam as curvas de calibração dos sensores de nível para as três bacias: RB01, RB10 e RB11, respectivamente. Essas curvas relacionam os valores registrados pelos sensores com os valores observados nas régua linimétrica em diferentes alturas da lâmina d'água.



APÊNDICE B – Tabelas de correlação

Tabela B1 - Matriz de correlação linear de Pearson para os dados da bacia RB01.

	ln Qa	ln Qa ₁	ln API ₅	ln API ₃	t	ln Pte	tP	ln IP	ln IP ₁₀	t _{pico}	ln TiQ	ln Q _{me}	ln Q _{med}	ln PSS ₂	ln PSS ₁
ln Qa	1	0,93	0,51	0,39	0,29	0,33	0,26	0,26	0,3	-0,05	0,69	0,75	0,82	0,6	0,69
ln Qa ₁		1	0,44	0,31	0,46	0,28	0,22	0,23	0,23	0,06	0,59	0,7	0,76	0,55	0,63
ln API ₅			1	0,87	-0,34	-0,05	-0,29	-0,11	0,1	-0,5	0,58	0,42	0,43	0,33	0,34
ln API ₃				1	-0,35	0,07	-0,34	0,02	0,26	-0,48	0,41	0,3	0,31	0,29	0,27
t					1	0,61	0,69	0,54	0,3	0,87	0,15	0,39	0,39	0,42	0,46
ln Pte						1	0,64	0,91	0,86	0,66	0,39	0,58	0,56	0,72	0,71
tP							1	0,59	0,27	0,73	0,48	0,61	0,57	0,65	0,66
ln IP								1	0,89	0,62	0,41	0,59	0,56	0,66	0,69
ln IP ₁₀									1	0,32	0,31	0,45	0,43	0,6	0,59
t _{pico}										1	0,06	0,27	0,23	0,33	0,36
ln TiQ											1	0,95	0,93	0,84	0,9
ln Q _{me}												1	0,99	0,87	0,95
ln Q _{med}													1	0,85	0,94
ln PSS ₂														1	0,97
ln PSS ₁															1

* Os dados destacados em negrito são aqueles significativos ($p < 0,05$).

Tabela B2 - Matriz de correlação linear de Pearson para os dados da bacia RB10.

	ln Qa	ln Qa ₁	ln API ₅	ln API ₃	t	ln Pte	tP	ln IP	ln IP ₁₀	t _{pico}	ln TiQ	ln Q _{me}	ln Q _{med}	ln PSS
ln Qa	1	0,91	0,66	0,54	-0,12	0,31	0,23	0,28	-0,02	-0,04	0,49	0,61	0,76	0,44
ln Qa ₁		1	0,65	0,56	-0,18	0,2	-0,02	0,19	0,1	-0,16	0,34	0,4	0,55	0,3
ln API ₅			1	0,96	-0,37	0,15	-0,19	0,11	0,23	-0,18	0,18	0,22	0,35	0,05
ln API ₃				1	-0,5	0,12	-0,27	0,07	0,32	-0,33	0,15	0,13	0,26	-0,01
t					1	0,34	0,66	0,29	-0,2	0,88	0	0,31	0,2	0,22
ln Pte						1	0,68	0,96	0,55	0,16	0,77	0,8	0,74	0,87
tP							1	0,56	-0,2	0,57	0,46	0,73	0,65	0,64
ln IP								1	0,64	0,1	0,8	0,79	0,72	0,88
ln IP ₁₀									1	-0,39	0,52	0,24	0,2	0,43
t _{pico}										1	-0,22	0,19	0,11	-0,03
ln TiQ											1	0,89	0,86	0,93
ln Q _{me}												1	0,98	0,9
ln Q _{med}													1	0,86
ln PSS														1

* Os dados destacados em negrito são aqueles significativos ($p < 0,05$).

Tabela B3 - Matriz de correlação linear de Pearson para os dados da bacia RB11.

	ln Qa	ln Qa ₁	ln API ₅	ln API ₃	t	ln Pte	tP	ln IP	ln IP ₁₀	t _{pico}	ln TiQ	ln Q _{me}	ln Q _{med}	ln PSS
ln Qa	1	0.9	0.67	0.56	0.05	0.34	0.35	0.33	-0.07	0.16	0.64	0.75	0.79	0.65
ln Qa ₁		1	0.74	0.65	0.02	0.16	0.01	0.19	0.07	0.04	0.39	0.45	0.5	0.38
ln API ₅			1	0.97	-0.27	0.15	-0.18	0.16	0.24	-0.09	0.26	0.31	0.38	0.19
ln API ₃				1	-0.43	0.16	-0.25	0.14	0.35	-0.25	0.23	0.24	0.31	0.13
t					1	0.17	0.44	0	-0.37	0.9	-0.2	0.07	0.03	0.08
ln Pte						1	0.63	0.9	0.47	0.24	0.51	0.59	0.57	0.55
tP							1	0.43	-0.34	0.58	0.45	0.68	0.66	0.61
ln IP								1	0.61	0.02	0.62	0.6	0.57	0.59
ln IP ₁₀									1	-0.49	0.25	0.03	0.01	0.12
t _{pico}										1	-0.14	0.22	0.2	0.16
ln TiQ											1	0.92	0.9	0.94
ln Q _{me}												1	0.99	0.96
ln Q _{med}													1	0.94
ln PSS														1

* Os dados destacados em negrito são aqueles significativos ($p < 0,05$).

