XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
ÁGUA • DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIOAMBIENTAL
17 – 22 DE NOVEMBRO DE 2013 – BENTO GONÇALVES / RS
ABRH ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS

RELAÇÕES ENTRE VAZÃO MÁXIMA E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO EM TRÊS BACIAS EMBUTIDAS

Albert Teixeira Cardoso [1] & Pedro Luiz Borges Chaffe [2] & Masato Kobiyama [3] & Fernando Grison [4]*

Resumo – Medições e estimativas de transporte de sedimentos em rios são importantes para a quantificação de diversos processos e impactos ambientais. A estimativa de produção de sedimentos em suspensão para eventos de chuva através da relação com a vazão máxima do evento é um método relativamente novo, mas que se mostra promissor. A vazão e a concentração de sedimentos em suspenção foram monitoradas nos exutórios da Bacia Hidrográfica do Rio dos Bugres e em duas bacias embutidas. As séries monitoradas foram divididas em eventos individuais de chuva, os quais tiveram o valor de vazão máxima específica e produção de sedimentos em suspensão específica (PSS_{esp}) calculados. Por meio de análise de regressão linear simples essas duas variáveis foram avaliadas. Os valores de R^2 ajustado foram altos para todas as bacias, os modelos gerados apresentam ajustes significativos, entre 0,80 e 0,98. Foi encontrada uma relação linear positiva entre produção de sedimentos em suspensão e a área da bacia. A tendência do aumento na PSS_{esp} da bacia menor para a maior pode ter sido causada pelas diferenças no uso e cobertura do solo e pelas diferenças na variação da vazão.

Palavras-Chave – Vazão máxima, produção de sedimentos em suspensão, bacias embutidas.

PEAK DISCHARGE AND SUSPENDED SEDIMENT YIELD RELATIONSHIPS IN THREE NESTED BASINS

Abstract – Measurement and estimation of sediment transport in river basins is important for the quantification of several processes and impacts on the environment. Estimating suspended sediment yield for single storm events by a relationship with peak discharge is a promising method. Discharge and suspended sediment concentration were monitored at the outles of the Bugres River basin and two of its smaller nested basins. The series were divided into single storm events and later the specific peak discharge and specific suspended sediment yield (PSS_{esp}) were calculated. Those two variables were evaluated using a simple linear regression analysis. The models presented high adjusted R^2 values for all basins, showing values of 0.80 up to 0.98. A positive linear relationship was found between suspended sediment yield and basin area. Different land uses and the different range in observed discharge were found to be the possible cause for the trend in the increase of the PSS_{esp} from the smallest to the largest basin.

Keywords – Peak discharge, suspended sediment yield, nested basins.

[1] Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. e-mail: albert.cardoso@posgrad.ufsc.br
[2] Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. e-mail: pedro.chaffe@ufsc.br
[3] Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. e-mail: masato.kobiyama@ufrgs.br
[4] Curso de Engenharia Hídrica, Universidade Federal de Pelotas - UFPEL. e-mail: fernando.grison@ufpel.edu.br
* Autor Correspondente

INTRODUÇÃO

A medição de sedimentos em rios é necessária para a quantificação de diversos processos e impactos ambientais: estimativas de erosão do solo, estudos de qualidade da água, assoreamento de lagos e reservatórios e também em estudos de transporte de contaminantes e poluentes difusos (Kothyari *et al.*, 2002; Neal *et al.*, 2006; Peart *et al*., 2005).

Em grandes rios o método tradicional utilizado para quantificar a produção de sedimentos em suspensão (*PSS*) na bacia é por meio da curva-chave de sedimentos, que relaciona concentração de sedimentos em suspensão (*CSS*) e a vazão (Carvalho, 1994). Por meio dessa curva-chave a produção de sedimentos da bacia pode ser estimada apenas com o uso da vazão, que normalmente é observada diariamente.

O problema no uso a curva-chave de sedimentos 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 (Finlayson, 1985). Além disso, em bacias menores, o uso dessa curva não é muito apropriado, pois pode levar a interpretações errôneas, geradas pela falta de linearidade e alta dispersão da relação entre vazão e *CSS* (Duvert *et al*., 2012).

A vazão de pico ou vazão máxima durante um evento é um fator que pode ser utilizado na previsão de *PSS* em bacias pequenas (Duvert *et al*., 2010). O uso do valor de vazão máxima para estimar a *PSS* difere do uso da curva-chave de sedimento tradicional, pois a curva-chave tradicional é utilizada para realizar estimativas de *PSS* para períodos, normalmente anual, enquanto a vazão máxima é utilizada para estimar a *PSS* do evento.

A estimativa da *PSS* para eventos de chuva é realizada através de uma regressão entre o valor máximo de vazão atingido durante o evento e a *PSS* do evento, que é o produto da concentração pela vazão. Rankl (2004) obteve coeficientes de determinação entre *PSS* e vazão máxima que variaram entre 89% a 97%. Duvert *et al*. (2012) conseguiram coeficientes de 58% entre essas variáveis. Tais resultados demonstram que em bacias pequenas pode existir uma relação significativa entre essas variáveis. Nesse sentido, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a relação entre vazão máxima e a *PSS* do evento em três bacias embutidas e também comparar o efeito da escala espacial da bacia nessa relação.

ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do Rio dos Bugres (RB01) e duas bacias menores embutidas nessa (RB10 e RB11) estão localizadas no norte do estado de Santa Catarina, próximo à divisa com o estado do Paraná, no município de Rio Negrinho (Figura 1 a).

O uso do solo nas bacias é composto por floresta nativa, reflorestamento, agricultura e pastagem (Figura 1 b). A vegetação nativa na região é caracterizada por Floresta Ombrófila Mista Montana, também conhecida como Floresta de Araucária ou Floresta de Pinheiro-brasileiro. A Tabela 1 apresenta o percentual de uso e cobertura do solo em cada bacia.

METODOLOGIA

Monitoramento hidrossedimentológico

O monitoramento foi realizado no exutório das três bacias: RB01, RB10 e RB11 (Figura 2), com o uso de sensores de nível e de turbidez. No exutório da bacia RB01 também foi realizado o monitoramento da precipitação. O intervalo de monitoramento de nível, turbidez e precipitação foi de 10 minutos.

O período de monitoramento nas três bacias de estudo foi de 10 meses e 20 dias, entre 16/12/2011 e 05/11/2013.

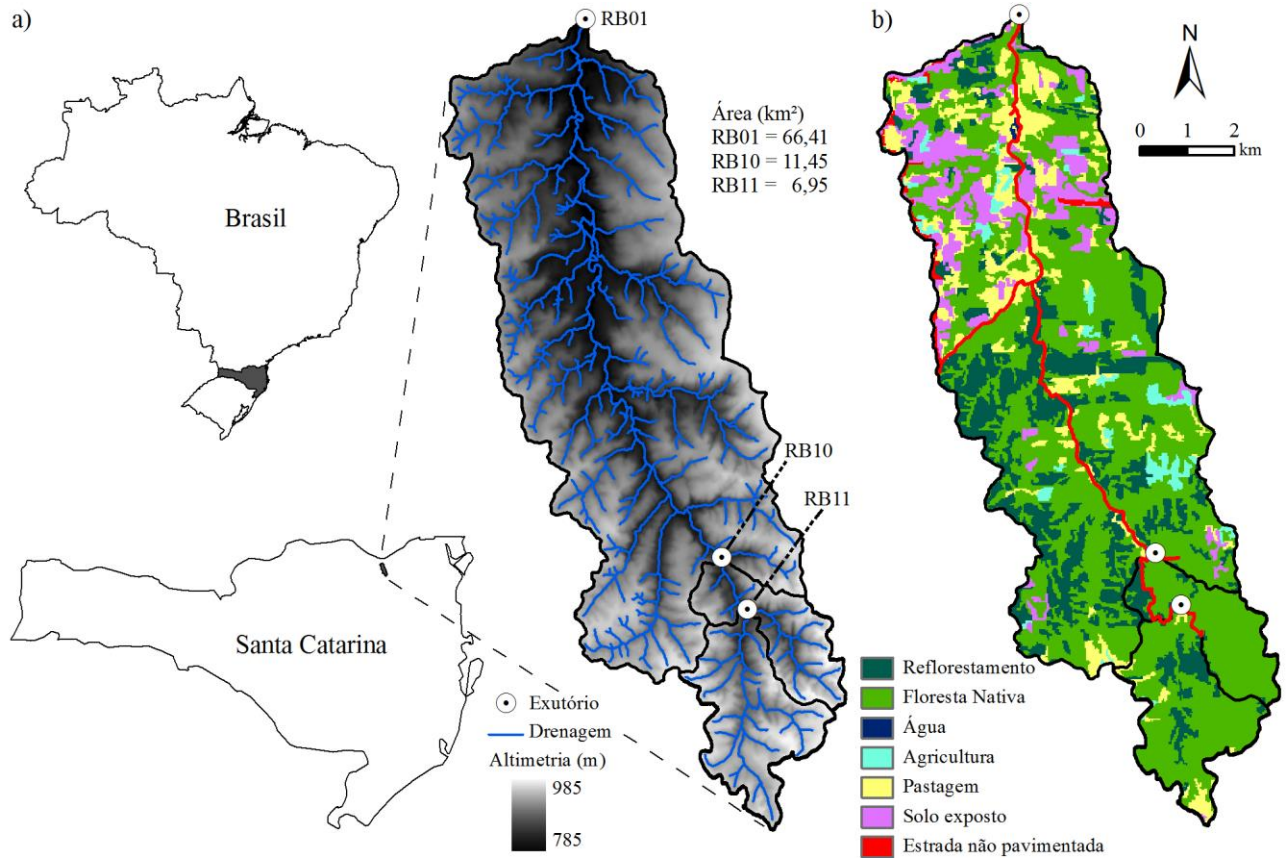

Figura 1 – a) Mapa de Localização contendo a área e a drenagem da Bacia Hidrográfica do Rio dos Bugres (RB01) e das duas bacias embutidas nessa (RB10 e RB11), b)Mapa de uso e cobertura do solo.

Tabela 1 – Percentual de uso do solo nas bacias de estudo.

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

A transformação dos dados de nível em dados de vazão foi realizada por meio da utilização de curvas-chave de vazão, criadas para cada uma das três bacias por Grison (2013). Para diminuir os erros na estimativa da vazão devido à extrapolação, decidiu-se utilizar essas curvas-chave até a cota de margem plena de cada seção de monitoramento. As cotas de margem plena correspondem a 2,25 m, 1,35 m e 1,22 m, para as bacias RB01, RB10 e RB11, respectivamente.

As transformações dos dados de turbidez (NTU) em *CSS* ($mg.L^{-1}$) foram realizadas por meio de regressão entre essas duas variáveis. Para a criação dessas análises de regressão foram realizadas coletas de amostras no exutório das bacias em diferentes condições de turbidez. O material sólido em suspensão das amostras foi quantificado e relacionado com os valores dos sensores de turbidez. As equações de regressão entre turbidez e *CSS* para as três bacias foram estabelecidas a partir de ajustes lineares.

A delimitação do começo dos eventos foi realizada da seguinte forma: o início foi selecionado a partir do momento em que a vazão ou a *CSS* começou a subir. A delimitação do término dos eventos foi considerada quando o valor da *CSS* chegou ao mesmo valor que estava imediatamente antes do início de sua ascensão. No total foram separados 17 eventos para as bacias RB01 e RB11 e 18 eventos para a bacia RB10.

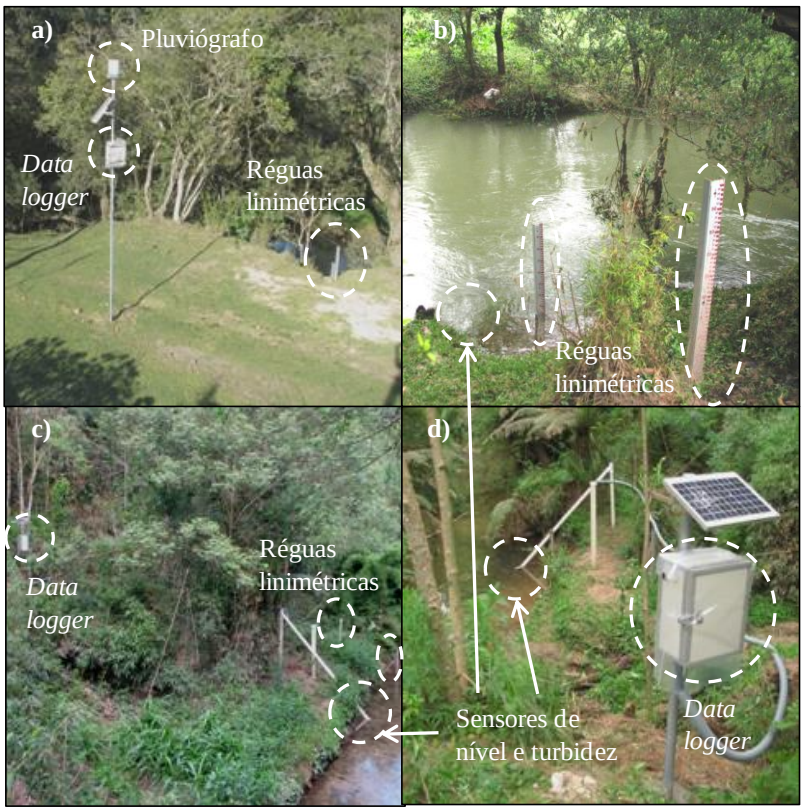

Figura 2 - Monitoramento hidrossedimentológicos no exutório das três bacias: a) e b) bacia RB01, monitoramento de precipitação, turbidez e nível; c) bacias RB10 e d) RB11, monitoramento de nível e turbidez.

Cálculo da Produção de Sedimentos em Suspensão e vazão máxima por evento

Os valores de *PSS* para as três bacias foram obtidos a partir dos registros com frequência de 10 minutos. O calculo da *PSS* para cada evento foi realizado através da seguinte equação:

$$PSS_{ev} = \sum_{i=1}^{T/\Delta T} CSS \cdot Q \cdot 10^{-6} \Delta t \qquad (1)$$

onde PSS_{ev} é a produção de sedimentos em suspensão durante um evento (t), *CSS* é a concentração de sedimentos em suspensão ($mg.L^{-1}$), *Q* é a vazão ($m^3.s^{-1}$), Δt é o intervalo de tempo do monitoramento (s) e *T* é a duração total do evento (s).

Para realizar a comparação da PSS_{ev} entre as bacias utilizou-se a *PSS* específica (PSS_{esp}) calculada da seguinte maneira:

$$PSS_{esp} = \frac{PSS_{ev}}{A} \cdot 10^{-3} \qquad (2)$$

onde PSS_{esp} é a produção de sedimento em suspensão específica ($kg.km^{-2}$) e *A* é a área de drenagem da bacia (km^2).

O valor de vazão máxima utilizado foi o maior valor de vazão registrado durante o evento ($m^3.s^{-1}$). Assim como a *PSS*, para realizar a comparação entre as bacias foram utilizados os valores de vazão máxima específica, $Qmax_{esp}$ ($mm.dia^{-1}$).

Regressão linear simples

Para verificar a existência de alguma relação entre a vazão máxima e a produção de sedimento em suspensão foi realizada uma análise de regressão linear simples. Como fisicamente não existe

produção de sedimentos em suspensão se a vazão for zero, então o intercepto utilizado no modelo também foi forçado a passar pelo zero.

O modelo de regressão linear simples, sem intercepto, é definido por:

$$Y_i = \beta_1 x_i \qquad i = 1,....n \tag{3}$$

onde Y_i é a variável dependente e representa o valor da variável resposta na i-ésima observação, β_1 é o coeficiente angular do modelo, x_i é a variável independente e representa o valor da variável explicativa na i-ésima observação e n é o tamanho da amostra.

O coeficiente angular (β) do modelo com intercepto zero é estimado por:

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i Y_i}{\sum_{i=1}^{n} x_i^{\,2}} \tag{4}$$

A qualidade do ajuste do modelo foi avaliada através do coeficiente de determinação R^2 ajustado, que é uma modificação do R^2, dado por:

$$R^2_{ajustado} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p}\right) \cdot \left(1 - R^2\right) \tag{5}$$

em que p é o número total de regressores do modelo linear.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Variabilidade nos dados entre as bacias

Os valores de $Qmax_{esp}$ possuíram variação um pouco maior na bacia RB01, com valor mínimo de 0,83 e máximo de 72,71 mm.dia^{-1}. Nas bacias RB10 e RB11 a amplitude dos valores de $Qmax_{esp}$ foram parecidas, os valores mínimos de $Qmax_{esp}$ foram de 1,68 mm.dia^{-1} na bacia RB10 e 1,35 mm.dia^{-1} na bacia RB11 e os valores máximos foram de 33,62 mm.dia^{-1} na bacia RB10 e 33,23 mm.dia^{-1} na bacia RB11. Os valores da mediana foram parecidos entre as amostras, sendo 5,55, 8,21 e 6,16 mm.dia-1, para RB01, RB10 e RB11, respectivamente (Figura 3 a).

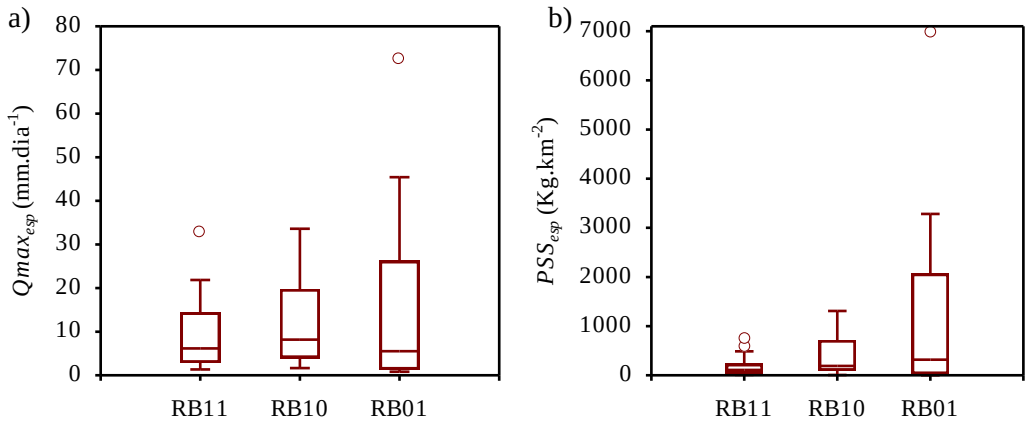

Figura 3 – Gráficos *box plot* a) Distribuição dos valores de vazão máxima específica por evento; b) Distribuição dos valores de produção de sedimento em suspensão específica.

A PSS_{esp} também teve maior variabilidade na bacia RB01 (Figura 3 b) entretanto, sua amplitude é significativamente maior do que a bacia RB10, que foi a segunda bacia com maior variabilidade. Os valores mínimos de PSS_{esp} por evento ficaram próximos entre as bacias: 2,45, 6,67 e 10,32 kg.km^{-2}, respectivamente para as bacias RB01, RB10 e RB11. A mediana, diferente do que aconteceu com a $Qmax_{esp}$, não permaneceu estável, mas sim aumentou progressivamente para a bacia maior. A mediana na bacia RB11 foi de 109,04 kg.km^{-2}, na bacia RB10 foi 190,71 kg.km^{-2} e

na bacia RB01 foi 317,94 kg.km^{-2}. Visto que os valores mínimos de PSS_{esp} foram próximos, os valores máximos foram os principais responsáveis pela diferença na variabilidade da distribuição, a bacia RB11 teve valor máximo de 779,39 kg.km^{-2}, a bacia RB10 de 1308,90 kg.km^{-2} e a RB01 de 3281,50 kg.km^{-2}, com um *outlier* de 6990,47 kg.km^{-2}.

Regressão entre PSS_{esp} e $Qmax_{esp}$ nas bacias

O gráfico de dispersão entre PSS_{esp} e $Qmax_{esp}$ dos eventos utilizados nesse estudo para todas as bacias é apresentados na Figura 4 a). Na Figura 4 b) estão apresentados os ajustes lineares que foram gerados a partir dos dados dos eventos. Os valores de R² ajustado foram altos para todas as bacias, demonstrando que os modelos gerados para as três bacias apresentam ajuste significativos e que as variáveis possuem relação significativa e positiva. A bacia RB10 apresentou o menor R² ajustado, de 0,80, enquanto o modelo da bacia RB11 apresentou 0,89 e da bacia RB01 0,98. Na Figura 4 b) observa-se que o intervalo de confiança (linhas tracejadas) dos ajustes das bacias RB11 e RB10 se sobrepõem, o que demonstra que os resultados gerados pelos modelos nessas duas bacias são parecidos. Resultado diferente é observado na bacia RB01, onde a curva de ajuste, mesmo com o intervalo de confiança, possui valores significativamente diferentes das bacias RB10 e RB11.

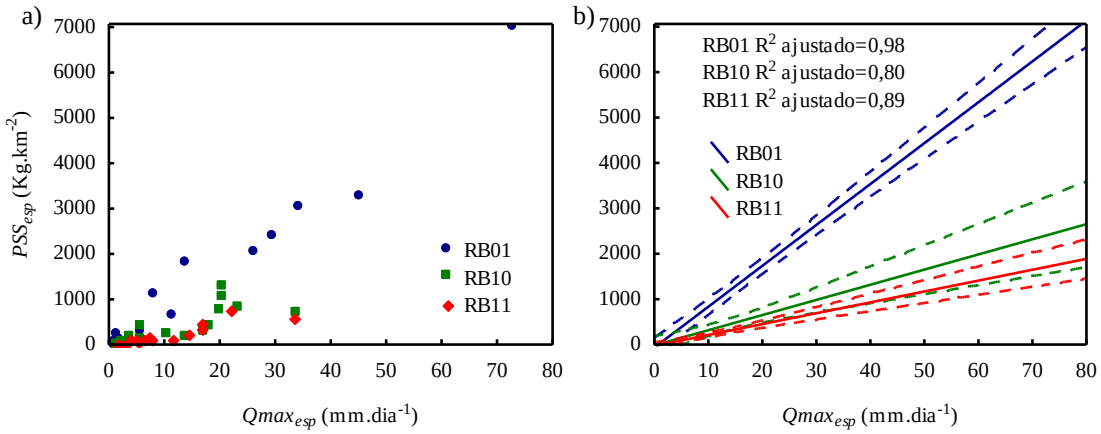

Figura 4 – a) Gráfico de dispersão da relação PSS_{esp} e $Qmax_{esp}$ para todos os eventos de todas as bacias, b) Curvas de ajuste linear e intervalos de confiança das regressões.

As equações dos modelos de regressão gerados para as bacias foram as seguintes:

RB11 $$PSS_{esp} = 22{,}41 \cdot Qmax_{esp} \quad (6)$$

RB10 $$PSS_{esp} = 32{,}68 \cdot Qmax_{esp} \quad (7)$$

RB01 $$PSS_{esp} = 88{,}42 \cdot Qmax_{esp} \quad (8)$$

Os coeficientes angulares (β) das equações 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 quase três vezes maior que o β da bacia RB10. Isso significa que uma mudança unitária na $Qmax_{esp}$ é mais significativa na bacia maior que na bacia menor.

Produção de sedimentos em suspensão e a escala espacial das bacias

Os modelos de regressão mostraram que a relação entre PSS_{esp} e $Qmax_{esp}$ nas bacias RB11 e RB10 são semelhantes, indicando que a produção de sedimentos em suspensão por unidade de área nessas bacias são parecidas. Entretanto, a regressão gerada para a bacia RB01 apresentou comportamento diferente, com maior produção de sedimentos em suspensão quando comparada as bacias menores, o que apresenta uma tendência de relação positiva entre produção de sedimentos em suspensão e área da bacia. Geralmente essa relação entre produção de sedimentos específica e área da bacia é negativa, ou seja, quanto maior a área menor a produção de sedimentos (Walling, 1983; Owens & Slaymaker, 1992).

Na área de estudo, parte desta maior PSS_{esp} na bacia RB01 pode ser explicada pela presença de também maiores $Qmax_{esp}$ na bacia RB01, como apresentado na Figura 3 a). Todavia, como mostra a Figura 3 b), a variação dos valores de PSS_{esp} na bacia RB01em relação as outras bacias é mais significativa quando comparada com a variação da $Qmax_{esp}$, o que indica que a maior produção de sedimentos na bacia RB01 não pode ser explicada apenas pela variação da $Qmax_{esp}$.

Birkinshaw e Bathurst (2006) também encontraram relações positivas entre área da bacia e produção de sedimentos. Os autores relacionaram esse resultado com a intensificação percentual do uso do solo com atividades erosivas à medida que o tamanho da bacia aumentou. Com base nos dados da Figura 1 b) e Tabela 1, verifica-se que as bacias RB11 e RB10 possuem percentuais de uso do solo parecidos, enquanto a bacia RB01 apresenta valores diferentes. Para auxiliar o estabelecimento da relação entre uso do solo e a PSS_{esp} nas bacias de estudo, os usos do solo apresentados na Tabela 1 foram resumidos em dois tipos: erosivos e não erosivos. Floresta nativa, água e reflorestamento foram classificados como não erosivos e os demais (agricultura, pastagem, solo exposto e estradas) foram considerados erosivos. O uso do solo para reflorestamento foi considerado não erosivo pois, de maneira geral, pesquisas apontam que esse tipo de uso quando comparado a outros diminui a produção de sedimento na bacia (Castaldi & Chiocchini, 2012).

A Figura 5 mostra os gráficos *box plot* e os percentuais de usos erosivos e não erosivos em cada bacia, para facilitar a visualização os *outliers* foram removidos.

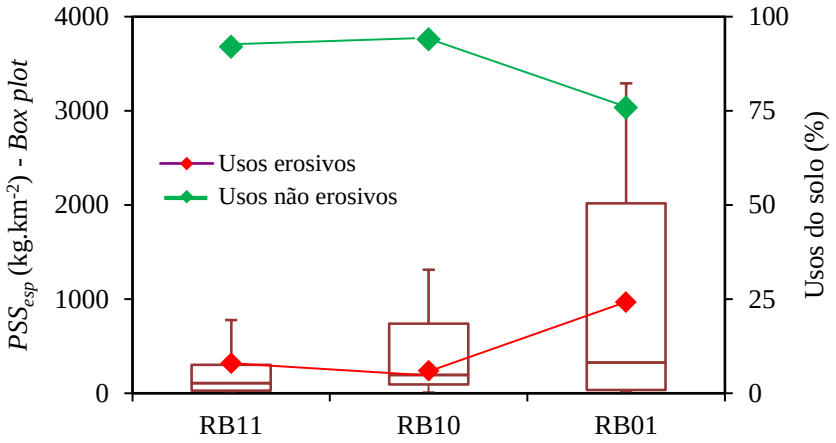

Figura 5 – Relação entre PSS_{esp} e percentual de uso do solo nas bacias.

Entre as bacias menores percebe-se que, apesar de PSS_{esp} ser um pouco maior na bacia RB10 que na bacia RB11, os percentuais de usos erosivos e não erosivos são semelhantes. As bacias RB11 e RB10 apresentaram 91,5 e 94,1% de usos não erosivos e 8,5 e 5,9% de usos erosivos, respectivamente. Comparada as duas bacias menores, a bacia RB01 destaca-se tanto na PSS_{esp} quanto nos percentuais de usos do solo, que foram 75,9% para não erosivos e 24,1% para erosivos.

O diagnóstico comparativo entre os usos do solo das bacias evidencia que este parâmetro, juntamente com variação da vazão ($Qmax_{esp}$), também pode ser explicativo do aumento na PSS_{esp} da bacia menor para a maior.

CONCLUSÕES

A análise exploratória entre as variáveis PSS_{esp} e $Qmax_{esp}$ mostrou que, para ambas, a variação e os valores aumentam da bacia menor (RB11) para a bacia maior (RB01). Entretanto essa diferença é mais significativa na PSS_{esp} do que na $Qmax_{esp}$.

A regressão linear simples da relação PSS_{esp} e $Qmax_{esp}$ apresentou ajustes significativos e positivos, com R^2 ajustado de 0,89, 0,80 e 0,98. Através da observação do gráfico de dispersão com os intervalos de confiança e também dos coeficientes angulares da regressão observou-se que os

resultados gerados para as bacias RB11 e RB10 são parecidos, enquanto a bacia RB01 apresentou comportamento diferente.

A bacia RB01 apresentou maior PSS_{esp} quando comparada as bacias menores, o que significa uma tendência de relação positiva entre produção de sedimentos em suspensão e área da bacia. Parte dessa relação positiva pode ser explicada pela variação na vazão ($Qmax_{esp}$).

Por meio do diagnóstico dos usos do solo, observou-se que a bacia RB01 possui percentualmente mais usos erosivos do solo, quando comparado às duas bacias menores. Este resultado pode auxiliar na explicação do aumento da PSS_{esp} com o aumento da área da bacia.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Davide Franco (LaHiMar/UFSC), e aos membros do laboratório de hidrologia (LabHidro/UFSC) pelas discussões e críticas ao trabalho. À CAPES e ao FINEP pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

BIRKINSHAW, S. J.; BATHURST, J. C. (2006). Model study of the relationship between sediment yield and river basin area. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 31, n. 6, p. 750-761.

CARVALHO, N. O. (1994). *Hidrossedimentologia prática*. Rio de Janeiro: CPRM, 372 p.

CASTALDI, F; CHIOCCHINI, U. (2012). Effects of land use changes on badland erosion in clayey drainage basins, Radicofani,Central Italy. *Geomorphology* 169-170, pp. 98-108.

DUVERT, C.; GRATIOT, N.; EVRARD, O.; NAVRATIL, O.; NÉMERY, J.; PRAT, C; ESTEVES, M. (2010). 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.

DUVERT, C.; NORD, G.; GRATIOT, N.; NAVRATIL, O.; NADAL-ROMERO, E.; MATHYS, N.; NÈMERY, J.; REGUES, D.; GARCIA_RUIZ, J. M.; GALLART, F.; ESTEVES, M. (2012). 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.

FINLAYSON, B.L. (1985). Field calibration of a recording turbidity meter. *Catena* 12:141–147

GRISON, F. (2013). *Estudo da geometria hidráulica do rio dos Bugres, no município de Rio Negrinho – SC*. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.

KOTHYARI, U.C. (2003). Estimation of temporal variation of sediment yield using GIS. *Hydrological Sciences Journal* 47:693–706.

NEAL, C.; NEAL, M.; LEEKS, G.J.L. (2006). Suspended sediment and particulate phosphorus in surface waters of the upper Thames Basin, UK. *Journal of Hydrology*. 330:142–154.

OWENS, P.; SLAYMAKER, O. (1992). 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.

PEART, M.R.; NG, K.Y.; ZHANG, D.D. (2005). Landslides and sediment delivery to a drainage system: some observations from Hong Kong. *J. of Asian Earth Sci*. 25:821–836.

RANKL, B. J. G.; NORTON, G. A.; SURVEY, U. S. G. (2004). 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.

WALLING, D.E. (1983). The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*.69,209-237.