XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

VIABILIDADE DE CURVAS-CHAVE DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO: ANÁLISE PARA O ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Viviane Rodrigues Dorneles [1]; Samuel Beskow [2] & Maria Cândida Moitinho Nunes [3]

RESUMO

A intensificação na utilização dos recursos hídricos e do solo gera impactos sobre o meio ambiente, especialmente associados a processos erosivos e suas consequências, tornando-se importante o conhecimento e a quantificação do transporte de sedimentos em suspensão em bacias hidrográficas. O objetivo desta pesquisa foi avaliar a acurácia na estimativa do transporte de sedimentos em suspensão utilizando curvas-chave de sedimentos derivadas de séries históricas disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas (ANA) para o Estado do Rio Grande do Sul. Os dados históricos de Concentração de Sedimentos em Suspensão (C_{ss}), combinados com os dados de vazão (Q), foram convertidos e resultaram na série de Descarga Sólida em Suspensão (Q_{ss}) para cada estação analisada. Posteriormente, os dados de Q_{ss} e Q foram ajustados à um modelo potencial. A partir da avaliação dos índices estatísticos do coeficiente de determinação, de Nash Sutcliffe e Erro Relativo Percentual médio, os resultados demostraram que o modelo potencial apresentou ajuste satisfatório para a grande maioria das séries. Desta forma, curvas-chave de sedimentos pode ser consideradas ferramentas promissoras para a aplicação no caso das estações analisadas neste estudo.

ABSTRACT

The intensification of the use of water resources and soil generates impacts on the environment, especially associated with erosion processes and their consequences, thus making it necessary the knowledge and quantification of suspended sediment transport in watersheds. The objective of this research was to evaluate the accuracy of the suspended sediment transport estimation using sediment rating curves derived from historical series made available by the National Water Agency (ANA) for the State of Rio Grande do Sul. The historical data of suspended sediment concentration (Css), combined with streamflow values (Q), were converted and resulted in the series of Suspended Solids Discharge (Q_{ss}) for each analyzed station. Afterward, Q_{ss} and Q data were adjusted to a power model. Considering different statistical indices (coefficient of determination, coefficient of Nash-Sutcliffe and Mean Relative Percent Error), the results showed that the power model had a satisfactory adjustment for most of the historical series. Therefore, sediment rating curves can be considered as promising tools for application in the case of the stations analyzed in this study.

Palavras-Chave – modelagem hidrossedimentológica, descarga sólida em suspensão, estações sedimentométricas

1) Universidade Federal de Pelotas UFPEL, Campus ANGLO, Rua Gomes Carneiro 01, Pelotas, RS, 96075-630, (53) 3921-1240, vivianerdorneles@gmail.com.
2) Universidade Federal de Pelotas UFPEL, Campus ANGLO, Rua Gomes Carneiro 01, Pelotas, RS, 96075-630, (53) 3921-1240, samuel.beskow@ufpel.edu.br.
3) Universidade Federal de Pelotas UFPEL, Campus FAEM, Campus Universitário, S/N, Capão do Leão, RS, 96010-900, (53) 3275-7235, nunes.candida@gmail.com.

INTRODUÇÃO

O transporte de sedimentos em cursos d'água está estreitamente associado a fatores de erosão do solo, geomorfológicos, climáticos, de uso e manejo do solo e práticas agrícolas de uma região. Para o conhecimento da dinâmica dos processos hidrossedimentológicos numa bacia hidrográfica, parte do transporte de sedimentos pode ser monitorado a partir da descarga de sedimentos em suspensão (Q_{SS}), sendo sua quantificação importante, uma vez que influencia a qualidade da água, a capacidade de reservatórios (Ghafari *et al*. 2017), a pesca, a drenagem, a eutrofização de cursos devido ao excesso de nutrientes (Zhang *et al*. 2012), a sedimentação de canais e o assoreamento de portos, bem como outros impactos ecológicos e recreativos (Sadeghi *et al*. 2008).

Desta forma, informações precisas sobre a Q_{SS} são necessárias para muitos propósitos. No Brasil, a Agência Nacional de Águas (ANA) disponibiliza um portal integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), que oferece acesso ao banco de dados que contém todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN). Essas informações reúnem dados climatológicos e hidrológicos, como chuva, níveis fluviais, vazões e sedimentos. Esses dados são oriundos de coletas e registros de postos, dos quais alguns, ainda pouco utilizados comparativamente às estações fluviométricas e pluviométricas, possuem informações de concentração de sedimentos em suspensão (C_{SS}) associadas a vazões, o que permite calcular a Q_{SS}.

Considerando a necessidade de quantificar o transporte de sedimentos, em diferentes bacias hidrográficas, de maneira mais acessível, modelos empíricos de curvas-chave de sedimentos têm sido aplicados para representar a relação entre vazão (Q) e Q_{SS}. Em outras palavras, a curva-chave de sedimentos é utilizada devido à ausência de monitoramento do transporte de sedimentos de forma contínua (Sadeghi *et al*. 2008). Desta forma, profissionais da área de recursos hídricos utilizam-na com frequência para converter hidrogramas em séries de descarga sólida.

Porém, apesar de seu uso geral, várias dificuldades são reconhecidas em relação à precisão da curva ajustada. Devido à alterações geomorfológicas e de uso e manejo do solo, os dados de Q e C_{SS} utilizados podem variar e/ou ser modificados, apresentando uma flutuação ao longo do tempo, em que curvas-chaves utilizadas no passado nem sempre representarão adequadamente a relação entre Q e C_{SS} atuais (Zhang.*et al*. 2012). Outra contrariedade das curvas-chave de sedimento é que o efeito da histerese (atraso na evolução de um fenômeno físico em relação a outro), entre os valores de Q e C_{SS}, nem sempre é identificado (Minella *et al*. 2011). Desse modo, o comportamento da Q e da C_{SS} durante os eventos não apresenta simultaneidade, em que o valor de pico da Q não necessariamente ocorra no mesmo instante que o da C_{SS}.

As incertezas nos valores previstos podem estar relacionadas à forma estatística utilizada para ajustar os valores observados de vazão e de transporte de sedimentos nas curvas-chave (Asselman,

2000), podendo subestimar ou superestimar os resultados. Na obtenção das C_{SS}, por exemplo, estas são normalmente subestimadas quando se utiliza a regressão de mínimos quadrados de variáveis log-transformadas (Cohn *et al*. 1992). Além disso, discordâncias na estimativa de Q_{SS} mediante curvas-chave de sedimentos são originados na extrapolação para determinação em altas vazões, que está relacionada com a quantidade e a qualidade dos dados observados (Iadanza e Napolitano, 2006). Porém, na prática a extrapolação da curva-chave é inevitável. Portanto, é importante conhecer quais são as incertezas que resultam do uso da curva-chave. Sadeghi *et al*. (2010) argumentam que coeficientes de determinação (R^2) menores que 50%, para os modelos testados na bacia de Khamesan, são um sinal de incapacidade das curvas-chave para estimar sedimentos.

Em vista disso, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o cenário atual e a aplicabilidade de curvas-chave de descarga sólida em suspensão versus vazão, para postos monitorados pela Agência Nacional de Águas, com base na análise dos dados oriundos de campanhas hidrológicas disponibilizados para o Estado do Rio Grande do Sul.

MATERIAL E MÉTODOS

O Estado do Rio Grande do Sul (RS), compreendido pelos paralelos 27° 04’ 49” e 33° 45’ 00” Sul e pelos meridianos 49° 42’ 22” e 57° 38’ 34” Oeste, localiza-se no Sul do Brasil (Figura 1). Segundo a classificação de Koppen o clima da região se enquadra no tipo Cfa e Cfb, apresentando chuva bem distribuída em todo o decorrer do ano (Sparovek *et al*. 2007).

Realizou-se um levantamento das estações, considerando o Rio Grande do Sul, com auxílio do Inventário das Estações Fluviométricas (ANA, 2009). Os dados de C_{SS} disponibilizados pela ANA são oriundos de campanhas hidrológicas de medição de vazão x amostragem de sedimentos em suspensão (ANA, 2009), fornecidos na unidade de mg L^{-1}. A Figura 1 apresenta a localização do Rio Grande do Sul e a distribuição espacial das estações sedimentométricas registradas no sistema da ANA para o estado.

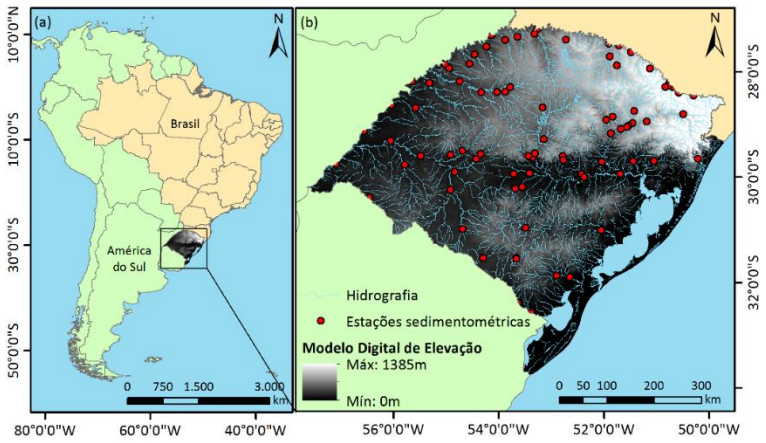

Figura 1 – (a) Localização do Estado do Rio Grande do Sul (RS) no Brasil e na América do Sul e (b) localização das estações sedimentométricas existentes no RS registradas no sistema Hidroweb/ANA

Posteriormente ao levantamento inicial, junto ao Hidroweb, fornecido pela ANA (http://www.snirh.gov.br/hidroweb/), obteve-se as séries históricas para as estações, identificou-se e eliminou-se aquelas que, apesar de estarem cadastradas no sistema, não continham registros de dados de C_{SS}. As estações com disponibilidade de dados foram selecionadas e os dados organizados a fim de realizar o ajuste das respectivas curvas-chave de sedimentos. Para obtenção da curvas-chave de sedimento por meio da utilização da Q_{SS}, o valor de C_{SS} é convertido em Q_{SS} após a multiplicação por Q e uma simples conversão de unidades, conforme Equação 1:

$$Q_{SS} = 0{,}0864 \ C_{SS} \ Q \qquad (1)$$

em que:

Q_{SS}: descarga sólida de sedimentos em suspensão, t dia^{-1};

C_{SS}: concentração de sedimentos em suspensão, mg L^{-1};

Q: vazão, m^3 s^{-1}.

A partir do conjunto de valores de Q_{SS}, a curva-chave de sedimentos em suspensão, para cada estação de monitoramento, conforme recomendado por Asselman (2000), Zhang *et al*. (2012) e Hassanzadeh *et al*. (2018), foi ajustada analiticamente à uma função de potência (Equação 2).

$$Q_{SS} = a \ Q^b \qquad (2)$$

em que:

a e *b*: coeficientes de ajuste.

Na sequência, diferentes índices estatísticos foram aplicados para avaliar a adequação do modelo das curvas-chaves às series de dados. Foi empregada a estatística erro absoluto relativo percentual médio (ERP) a fim de avaliar o desempenho de cada curva-chave analisada. O ERP (Equação 3) foi estabelecido para confrontar os valores de Q_{SS} estimados pela curva-chave com aqueles observados, calculados mediante Equação 1, a partir dos valores de Q e C_{SS} obtidos em campanhas hidrológicas, como recomendado por Sadeghi *et al*. (2008).

$$ERP = \frac{\sum\left[\left|\frac{(Qss_{Calc} - Qss_{Obs})}{Qss_{Obs}}\right|\right]}{N} 100 \qquad (3)$$

em que:

Q_{SSCalc}: descarga de sedimentos em suspensão estimada, t dia^{-1}, pelo modelo da curva-chave;

Q_{SSObs}: descarga de sedimentos em suspensão determinada a partir dos dados de Q e C_{SS} observados, t dia^{-1};

N: número de observações.

Da mesma forma, para avaliar a qualidade do ajuste do modelo da curva-chave foi utilizado o coeficiente de determinação (R^2) que pode variar de 0 a 1. O R^2 é a medida descritiva da qualidade do ajuste obtido, ou seja, a variabilidade nos dados que é explicada pelo modelo de regressão ajustado,

em que o valor de 1 indica perfeita relação entre os dados observados e aqueles obtidos pelo modelo ajustado.

Outro índice estatístico utilizado foi o de Nash e Sutcliffe (NS), definido por Nash e Sutcliffe (1970) e descrito na Equação 4, o qual determina a eficiência de um modelo em comparação com o valor médio.

$$NS = \frac{\Sigma(Qss_{Obs} - \overline{Qss_{Obs}})^2 - \Sigma(Qss_{Obs} - Qss_{Calc})^2}{\Sigma(Qss_{Obs} - \overline{Qss_{Obs}})^2} \quad (4)$$

em que:

$\overline{Qss_{Obs}}$: média das descargas de sedimentos em suspensão observadas, t dia^{-1}.

A eficiência da estatística NS mostra se o modelo ajustado fornece melhores estimativas do que a aplicação do valor médio. Valores de NS variam entre menos infinito a 1, onde 1 indica perfeita concordância entre os valores observados e os calculados. Valores negativos indicam que o valor médio observado é uma estimativa melhor do que as obtidas pelo modelo (Asselman, 2000).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seguindo os critérios propostos, identificou-se que, no total, 87 estações sedimentométricas estão devidamente registradas no portal Hidroweb/ANA, quando do desenvolvimento desta pesquisa, para o Rio Grande do Sul (RS). Contudo, verificou-se que destas, 63 efetivamente apresentam dados disponíveis para análise. Foi possível o ajuste do modelo e a estimativa dos valores dos coeficientes *a* e *b* em 56 das estações analisadas (Tabela 1). As estações 75185000, 76100000 e 87270000 apresentam valores de vazão igual a zero nas séries, o que impossibilita a aplicação do modelo da curva-chave por uma função de potência. Para as demais (85620000, 85625000, 87035000 e 88220000) não foi obtida a curva-chave, pois estas apresentam poucas medições disponíveis. Os coeficientes *a* e *b* das curvas ajustadas para as estações e os índices estatísticos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficientes *a* e *b* das curvas-chave ajustadas (Q_{SS} x Q) das estações sedimentométricas para o estado do Rio Grande do Sul.

CÓDIGO	*a*	*b*	R^2	ERP (%)	NS	CÓDIGO	*a*	*b*	R^2	ERP (%)	NS
70200000	0,073	1,450	0,65	97	0,22	76440000	0,308	1,310	0,63	158	0,00
70700000	0,427	1,090	0,38	150	0,26	76560000	0,448	1,280	0,76	82	0,63
72300000	1,140	0,953	0,38	121	0,31	76750000	0,550	1,300	0,82	87	0,40
72430000	0,256	1,450	0,75	56	0,31	76800000	0,557	1,220	0,74	67	0,43
72630000	0,169	1,560	0,63	119	0,72	77150000	2,690	0,981	0,64	82	0,07
73010000	0,056	1,420	0,64	88	0,37	77500000	0,447	1,290	0,92	51	0,46
73480000	0,269	1,210	0,71	63	0,11	79400000	1,350	1,280	0,79	60	0,14
74100000	0,018	1,560	0,61	113	0,40	85400000	0,237	1,230	0,63	80	0,43

CÓDIGO	a	b	R^2	ERP (%)	NS	CÓDIGO	a	b	R^2	ERP (%)	NS
74270000	0,257	1,440	0,63	121	0,21	85580000	8,860	0,874	0,77	79	0,68
74370000	0,409	1,270	0,48	164	0,07	85600000	1,260	1,170	0,88	55	0,33
74470000	0,469	1,350	0,46	299	0,01	85623000	0,433	1,590	0,73	131	0,16
74600000	0,268	1,540	0,65	100	0,36	85730000	4,530	0,791	0,87	43	0,69
74610000	0,034	2,040	0,89	39	0,49	85735000	0,175	1,600	0,81	85	0,12
74700000	0,305	1,480	0,73	62	0,08	85740000	0,406	1,160	0,73	94	0,78
74750000	0,713	1,440	0,70	68	0,34	85900000	0,090	1,450	0,82	58	0,53
74800000	0,0002	2,110	0,88	34	0,58	86100000	0,099	1,360	0,74	131	0,74
74900000	0,179	1,790	0,84	65	0,53	86410000	0,198	1,330	0,59	209	0,24
75155000	0,136	1,750	0,72	57	0,10	86470000	0,582	1,090	0,50	74	0,28
75186000	0,316	1,680	0,72	36	0,00	86500000	0,306	1,420	0,82	78	0,52
75205000	0,385	1,480	0,67	77	0,08	86510000	0,139	1,370	0,65	68	0,02
75295000	0,134	1,620	0,69	103	0,32	86560000	0,151	1,650	0,77	101	0,61
75320000	0,305	1,390	0,66	80	0,18	87380000	0,394	1,380	0,63	93	0,10
75450000	0,209	1,450	0,63	119	0,42	87590000	0,000	2,540	0,37	90	0,17
75500000	0,832	1,140	0,64	160	0,51	87905000	0,326	1,440	0,77	88	0,66
75700000	0,408	1,280	0,79	83	0,42	88176000	1,670	1,280	0,81	70	0,48
76120000	5,150	0,903	0,82	47	0,49	88177000	1,140	1,310	0,91	49	0,89
76310000	0,924	1,230	0,81	122	0,35	88181000	1,660	1,140	0,85	92	-9,99
76380000	5,270	1,050	0,80	59	0,33	88680000	12,26	0,781	0,69	42	0,67

R^2: coeficiente de determinação; ERP: Erro Relativo Percentual Médio, em %; NS: modelo Nash e Sutcliffe

Observa-se na Tabela 1 que, somente em 2 das 56 estações a estatística de NS indicou que o valor médio de Q_{SS} observado é uma estimativa melhor do que o obtido pelo modelo (76440000 Jaguari, com ERP=158,5% e R^2=0,63; e 88181000 Arroio Candiota Jusante, com ERP=92,3% e R^2=0,85). Para as demais (54), a estatística NS apontou que o modelo resulta em uma estimativa melhor do que o valor médio observado de Q_{SS}, sendo que o ERP variou de 34,2 a 298,6% (média de 89,8%) e R^2 de 0,37 a 0,92 (média de 0,71).

O ajuste do modelo da curva-chave resultou em maiores valores de R^2 (Tabela 1) para as estações 77500000 Quaraí (R^2=0,92 e ERP=50,8%), 88177000 Sanga Funda Montante (R^2=0,91 e ERP=48,9%), 74610000 Cascata Burica – Nova (R^2=0,89 e ERP=38%), 85600000 Passo das Tunas (R^2=0,88 e ERP=54,7%) e 74800000 Porto Lucena (R^2=0,88 e ERP=34,2%), 85730000 Passo Linha do Rio (R^2=0,87 e ERP=43,4%) e 88181000 Arroio Candiota Jusante (R^2=0,85 e ERP=92,3%). É eminente que os valores de R^2 maiores não necessariamente estão associados a valores menores de ERP, porém verifica-se que as estações que obtiveram R^2 maiores, apresentaram ERP baixos. Nesta perspectiva, é interessante notar a importância de utilizar-se um conjunto de índices estatísticos para avaliar um modelo aplicado a uma série de dados. Contudo, é possível alegar que as estações 74610000 e 74800000 apresentaram a melhor eficiência na estimativa dos valores de Q_{SS} a partir do modelo da curva-chave ajustado mediante a combinação dos índices estatísticos. A Figura 2 apresenta

o gráfico de ajuste para as estações 74610000 e 74800000, suas equações de ajuste e seus respectivos valores dos índices estatísticos de R^2 e ERP.

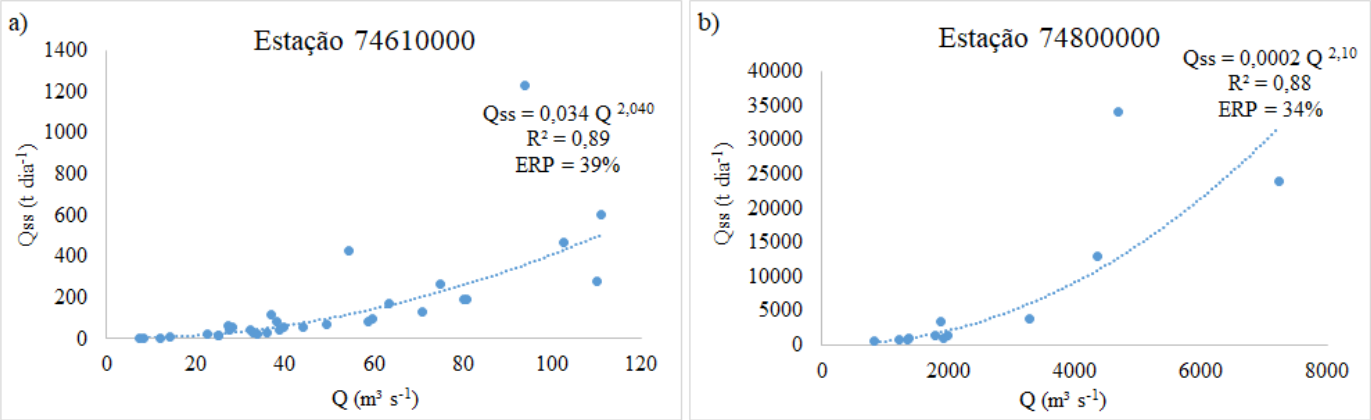

Figura 2 – Gráficos dos ajustes do modelo da curva-chave para as estações (a) 7461000 e (b) 74800000, as respectivas equações de ajuste e os valores dos índices estatísticos de R^2 e ERP.

Sadeghi *et al*. (2008) ao aplicarem dezessete modelos para avaliação da curva-chave de sedimentos (C_{SS} x Q), para uma bacia no Japão, obtiveram valores de ERP variando de 19,19 a 430,7% e R^2 entre 0,10 e 0,90, ou seja, similares aos encontrados nesse trabalho. Os autores reconheceram, juntamente aos índices estatísticos de eficiência, que a função de potência foi o melhor modelo para descrever essa relação para a bacia, com desempenho global de ERP de 152,5%, R^2 de 0,53, Erro Padrão da Estimativa de 0,70 e NS igual a 0,32. Assim, indica-se que se utilize, para cálculos adicionais, o menor ERP possível, associando ainda a valores das estatísticas, como o NS e R^2, onde serão encontradas as relações mais coerentes.

Os menores valores da estatística R^2 foram encontrados, para o ajuste da curva-chave, nas estações 87590000 Passo do Cação (R^2=0,37 e ERP=89,5), 70700000 Passo Socorro (R^2=0,38 e ERP=149,7%) e 72300000 Passo do Virgílio (R^2=0,38 e ERP=120,7). É considerada baixa eficiência da curva-chave, quando o R^2 é menor que 50% (Sadeghi *et al*. 2010), além disso, para esta situação erros maiores são encontrados, sendo recomendado que não se utilize a curvas-chaves para valores que extrapolem seus limites (Iadanza e Napolitano, 2006), neste sentido, esse comportamento foi verificado em apenas seis estações (70700000, 72300000, 74370000, 74470000, 86470000, 87590000). Estas estações apresentaram uma variação de ERP de 73,6 a 298,6%.

Para locais onde curvas-chave de sedimentos não se caracterizam adequadamente, a interação de fatores espaciais e temporais é um dos principais problemas enfrentados (Sadeghi *et al*. 2008). A intensa utilização do solo e dos recursos hídricos também podem ser discutidos neste sentido, pois geram impactos sobre a bacia hidrográfica, decorrendo numa complexa interação líquido-sólido (Ghafari *et al*. 2017), tornando importante o conhecimento dessa dinâmica a fim de relacionar com possíveis mudanças nos valores de C_{SS} e, consequentemente, nos valores de Q_{SS} ao decorrer do tempo.

Da mesma forma, curvas-chave podem não apresentar bom ajuste em função das mudanças nas vazões em períodos distintos de monitoramento. Para as estações analisadas, identificou-se que aquelas que apresentaram R^2 inferior a 0,50 e altos valores de ERP (média de 166%) iniciaram as amostragens a partir da década de 70 e demostraram que a característica de baixa eficiência do ajuste do modelo, está nos anos iniciais de medição, no começo da série. Neste caso, a separação das vazões em períodos, e divisão em trechos (períodos de anos, períodos secos e úmidos, trimestres, estações do ano ou períodos de primavera-verão e outono-inverno) é uma alternativa e a partir disso curvas-chave podem ser traçadas isoladamente (Zhang *et al*. 2012; Hassanzadeh *et al*. 2018).

A vantagem da curva-chave de sedimentos é que, uma vez desenvolvida, pode ser aplicada a dados passados de vazão, para estimativa de transporte de sedimentos, ou para preencher lacunas nos registros existentes (Sadeghi *et al*. 2008). No entanto, umas das principais deficiências na aplicação das curvas-chave é que a extrapolação, para estimar os valores de Q_{SS} em altas vazões, pode estar associada a erros e geralmente levam a subestimação na estimativa (Hassanzadeh *et al*. 2018). Segundo Hassanzadeh *et al*. (2018), esse viés na estimativa está diretamente relacionado com a distribuição das amostragens (altas e baixas vazões); neste contexto, pesquisadores têm buscado utilizar coeficientes de correção aplicados às curvas-chave a fim de diminuir a diferença entre os valores estimados e os observados, especialmente em altas vazões.

Além disso, utilização do modelo da curva-chave, da mesma forma, é criticado pelos profissionais da área de recursos hídricos, uma vez que curvas-chave ajustadas a um conjunto de valores não contínuos, ou seja, dados de amostragens aleatórias realizadas somente em alguns dias do ano (4 a 5 amostras), como os disponibilizados pela ANA e empregados neste trabalho, são utilizadas para gerar séries históricas de Q_{SS} em intervalos subdiários, como em eventos específicos de chuva, que apresentam diferentes variações de Q e C_{SS} em um pequeno intervalo de tempo. A oposição em se realizar esse tipo de uso em intervalos subdiários é a grande variação no transporte de sedimentos que ocorre nesta escala. A alternativa para este caso é a utilização de turbidímetros nas seções de monitoramento, onde é possível gerar registros contínuos de C_{SS} relacionados à medida de turbidez do curso (Minella *et al*. 2008).

Os coeficientes *a* e *b* da curva-chave de sedimentos, estimados por análise de regressão, não têm significado físico propriamente dito, no entanto, algumas interpretações físicas são muitas vezes atribuídas. De acordo com Zhang *et al*. (2012), altos valores do coeficiente *a* indicam que na bacia os sedimentos podem ser facilmente erodidos e transportados pelo escoamento, podendo representar a erodibilidade do solo e regiões que apresentam materiais intensamente intemperizados. O coeficiente *b*, por outro lado, é utilizado para indicar a unidade erosiva do rio. Quando apresenta valores elevados indica um forte aumento da capacidade de transporte de sedimento com um aumento na vazão do rio

(Asselman, 2000). Para as estações analisadas neste estudo, o coeficiente *b* manteve-se com um comportamento semelhante para todas as estações.

Para interpretação é apropriado também considerar a inclinação e a forma da própria curva-chave, que podem inferir sobre fatores e processos hidrossedimentológicos específicos. Para a maioria das estações analisadas neste estudo, os gráficos que representam a metodologia, têm uma inclinação que se move para cima, o que significa que a Q_{SS} mostra uma tendência crescente com a Q, sendo esse fenômeno já esperado no comportamento das séries sedimentométricas, representando também uma boa correlação entre os dados. Vários estudos diagnosticaram essa representação, tais como Asselman (2000), Zhang *et al*. (2012), Heng e Suetsugi (2014). As estações que apresentaram as curvas-chave de característica mais inclinada foram as estações 70200000 e 74800000. Curvas-chave inclinadas devem, portanto, ser características de cursos d'água com pouco transporte de sedimentos ocorrendo em baixas vazões, o que indica que o aumento da Q resulta em um impulso na C_{SS}, consequentemente na Q_{SS}, sugerindo que a maior quantidade de materiais e transportada quando o nível d'água aumenta (Asselman, 2000; Zhang *et al*. 2012).

Porém, observou-se que em algumas estações esse comportamento crescente é quase imperceptível, sendo que esta característica foi observada nas estações 74470000 e 76440000. As séries dessas estações apresentam um desempenho mais plano, indicando que com o aumento da Q não há um aumento considerável da Q_{SS}. Essa característica está em conformidade aos resultados encontrados por Sadeghi *et al*. (2008), que relataram que em geral, a inclinação das curvas-chave ajustadas, para a bacia de Hinotani-ike, no centro-sul do Japão, é relativamente baixa, sendo relacionada à disponibilidade de sedimentos suspensos na área de estudo, em combinação com o poder erosivo do escoamento para transportar este material. Heng e Suetsugi (2014) explicam que uma curva de caráter mais plano revela que sedimentos ou depósitos sedimentares soltos estão disponíveis para transporte em quase todas as faixas de Q, indicando também a características de seções de cursos d'água com materiais intensamente intemperizados.

CONCLUSÕES

Diante da avaliação do cenário atual, foi possível obter o ajuste de 56 curvas-chave de sedimentos, para estimativa da Q_{SS}, para o Estado do Rio Grande do Sul. Utilizando a função de potência o modelo da curva-chave de sedimentos mostrou-se adequado e apresenta boa eficiência quando aplicado ao conjuntos de valores de Q_{SS}, apresentando baixos erros e elevados coeficientes de determinação. Desta forma, o modelo é uma aplicável ferramenta, podendo ser utilizado por técnicos e profissionais da área de recursos hídricos, para relacionar a Q_{SS} e a Q, para a grande maioria dos postos monitorados pela Agência Nacional de Águas, sendo um modelo de uso viável no estado, com base nos dados disponíveis pela agência e analisados neste estudo. As estações que apresentaram

R^2 menor que 0,50 e altos ERP iniciaram suas medições na década de 70, onde está associada a baixa eficiência. Sugere-se, neste caso, que o modelo da curvas-chave seja aplicado na série subdividida em trechos, possibilitando que o período de maior viés seja desconsiderado, utilizando-se o restante dos períodos para futuras análises.

REFERÊNCIAS

ANA, Agência Nacional de Águas. Inventário das Estações Fluviométricas: Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica. (2009). Ministério do Meio Ambiente. 2ª Edição. Brasília – DF.

ASSELMAN, N. E. M. (2000). "*Fitting and interpretation of sediment rating curves*". Journal of Hydrology 234 (3), pp.228-248.

COHN, T. A.; CAULDER, D. L.; GILROY, E. J.; ZYNJUK, L. D.; SUMMERS, R. M. (1992). "*The validity of a simple statistical model for estimating fluvial constituent loads: an empirical study involving nutrient loads entering Chesapeake Bay*". Water Resources Research 28, pp.2353–2363.

GHAFARI, H.; GORJI, M.; ARABKHEDRI, M.; ROSHANI, G. A.; HEIDARI, A.; AKHAVAN, S. (2017). "*Identification and prioritization of critical erosion areas based on onsite and offsite effects*". Catena 156, pp.1-9.

HASSANZADEH, H.; BAJESTAN, M. S.; PAYDAR, G. R. (2018). "*Performance evaluation of correction coefficients to optimize sediment rating curves on the basis of the Karkheh dam reservoir hydrography, west Iran*". Arabian Journal of Geosciences 11, pp.595.

HENG, S.; SUETSUGI, T. (2014). "*Comparison of regionalization approaches in parameterizing sediment rating curve in ungauged catchments for subsequent instantaneous sediment yield prediction*". Journal of Hydrology 512, pp.240-253.

IADANZA C.; NAPOLITANO F. (2006). "*Sediment transport time series in the Tiber River physics and chemistry of the earth*". Parts A/B/C 31, pp.212–1227.

MINELLA, J.P.; MERTEN, G.H.; MAGNAGO, P.F. (2011). "*Análise qualitativa e quantitativa da histerese entre vazão e concentração de sedimentos durante eventos hidrológicos*". Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 15 (12), pp.1306-1313.

MINELLA, J.P; MERTEN, G.H.; REICHERT, J.M.; CLARKE, R.T. (2008). "*Estimating suspended sediment concentrations from turbidity measurements and the calibration problem*". Hydrological Processes 22, pp.1819-1830.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. (1970). "*River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles*". Journal of Hydrology 10 (3), pp.282–290.

SADEGHI S. H. R; FAZLI, S.; KHALEDI DARVISHAN, A. (2010). "*Evaluation of efficiency sediment rating curve in khamesan typically watershed*". National Seminar on Erosion and Sediment 4, pp. 6 -11.

SADEGHI, S. H. R.; MIZUYAMA, T.; MIYATA, S.; GOMI, T.; KOSUGI, K.; FUKUSHIMA, T.; ONDA, Y. (2008). "*Development, evaluation and interpretation of sediment rating curves for a Japanese small mountainous reforested watershed*". Geoderma, 144 (1), pp.198-211.

SPAROVEK, G.; LIER, Q.D.J.V.; DOURADO NETO, D. (2007). "*Computer assisted Koeppen climate classification: a case study for Brazil*". International Journal of Climatology 27, pp.257-266.

ZHANG, W.; WEI, X.; JINHAI, Z.; YULIANG, Z.; ZHANG, Y. (2012). "*Estimating suspended sediment loads in the Pearl River Delta region using sediment rating curves*". Continental Shelf Research 38, pp.35-46.