

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE DO EFEITO HISTERESE EM UMA BACIA RURAL A PARTIR DE DADOS DE TURBIDEZ

Lais Coelho Teixeira¹; Nilza Maria dos Reis Castro² & Olavo Correa Pedrollo³

RESUMO – Conhecer a dinâmica hidrossedimentológica é importante para o gerenciamento dos recursos hídricos e o manejo adequado dos solos. Porém em primeiro lugar deve-se compreender os processos hidrossedimentológicos de uma bacia hidrográfica. Assim, monitorar estes processos através de variáveis como vazão, concentração de sedimentos em suspensão (CSS), nível, precipitação e turbidez é fundamental para compreender o comportamento da produção e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica. Ao relacionar os dados de CSS e/ou turbidez com a vazão determina-se a curva de histerese, que é muito utilizada para auxiliar na localização das fontes de sedimentos e compreender as interações desde as fontes até o transporte de sedimentos na calha do rio. O objetivo dessa pesquisa é analisar o comportamento hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica rural a partir da interpretação da relação dos dados de turbidez com a vazão e identificar e classificar o efeito histerese. A metodologia utilizada consiste na interpretação de uma série de dados obtida por monitoramento contínuo na bacia em estudo, e a identificação qualitativa e quantitativa do efeito histerese. Foram identificados e analisados 12 eventos ocorridos entre maio e novembro de 2015. A maioria dos eventos analisados obtiveram laço de histerese no sentido horário com turbidez no ramo crescente maior que no ramo decrescente e os índices de histerese variando de 0,07 a 8, caracterizando a contribuição de sedimentos advindos de fontes próximas como margens do rio, leito e possíveis estradas vicinais.

ABSTRACT– Knowing the hydrosedimentological dynamics is important for the management of water resources and the proper management of soils. However, in the first place, it is necessary to understand the hydrosedimentological processes of a watershed. Thus, monitoring these processes through variables such as water flow, suspended sediment concentration (SSC), water level, precipitation and turbidity is fundamental to understand the behavior of sediment production and transport in a river basin. By relating the SSC and/or turbidity data to the water flow, the hysteresis curve, widely used to help locate the sediment sources and to understand the interactions from the sources to the sediment transport in the river channel, is set. Therefore, the objective of this research is to analyze the hydrosedimentological behavior of a rural watershed based in the interpretation of the relation of turbidity data to the water flow and to identify and classify the hysteresis effect. The methodology used consists in the interpretation of a series of data obtained by continuous monitoring of the studied watershed and the qualitative and quantitative identification of the hysteresis effect. Between May and November 2015, 12 events were identified and analyzed. Most of the analyzed events showed a clockwise hysteresis loop, with turbidity in the growing branch greater than in the descending branch, and hysteresis indexes ranging from 0.07 to 8, characterizing the contribution of sediments coming from nearby sources such as riverbanks, river bed and possible vicinal roads.

Palavras-Chave – Hidrossedimentologia; Histerese; Turbidez.

1) Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre (RS), (55) 99135-6739, lais.c.teixeira@gmail.com.

2) Professora Titular do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre (RS), nilza@iph.ufrgs.br

3) Professor Titular do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre (RS), olavopedrollo@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

A produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica resulta da erosão ocorrida nas cabeceiras, margens e leito dos rios que são carregados, chegando até o rio principal, além da contribuição dos sedimentos oriundos das estradas. Este processo é influenciado por diferentes fatores, que são: características físicas da bacia, uso e ocupação do solo, tipo de solo e mudanças climáticas. A produção de sedimentos é um fenômeno natural, porém em excesso pode ocasionar diversos problemas, entre eles, o assoreamento dos reservatórios e dos rios e a degradação dos corpos hídricos.

Conhecer a dinâmica hidrossedimentológica é importante para o gerenciamento dos recursos hídricos e o manejo adequado dos solos. Porém em primeiro lugar deve-se compreender os processos hidrossedimentológicos de uma bacia hidrográfica. Assim, monitorar estes processos através de variáveis como vazão, concentração de sedimentos em suspensão (CSS), nível, precipitação e turbidez é fundamental para compreender o comportamento da produção e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica.

A turbidez tem sido usada para auxiliar no monitoramento de sedimentos em suspensão em uma bacia por ter uma alta relação com a concentração de sedimentos em suspensão (CSS) (Sari *et al.*, 2017). Esta variável é capaz de proporcionar uma série contínua de sedimentos em suspensão devido às facilidades do seu monitoramento, uma vez que medições podem ser realizadas a cada 10 minutos através de um equipamento que mede e registra de forma automática. Porém, os valores de turbidez devem ser calibrados com medições convencionais periódicas de concentração de sedimentos, para garantir a boa relação entre CSS e turbidez (Merten *et al.*, 2011). Já a forma tradicional de se obter a CSS implicaria em ter uma equipe no local e na hora do evento para coletar as amostras de sedimentos, além da necessidade de se realizar análises em laboratório.

A interpretação dos dados adquiridos com o monitoramento é um passo inicial para a compreensão dos processos na bacia. Com estes dados é possível traçar os hidrogramas e os sedimentogramas, analisar a variabilidade temporal desses processos e inferir sobre o comportamento hidrossedimentológico de uma bacia. Ao correlacionar os dados de sedimentos com a vazão tem-se a curva de histerese, que é muito utilizada para auxiliar na localização da fonte de sedimentos e compreender as interações desde a fonte até o transporte dos sedimentos na calha do rio (Minella *et al.*, 2011).

Neste contexto, o objetivo dessa pesquisa é analisar o comportamento hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica rural a partir da interpretação da relação dos dados de turbidez com a vazão, além de identificar e classificar o efeito histerese.

2 HISTERESE

A histerese, é o aparecimento de um atraso no fenômeno físico em relação a outro, ou seja, o pico de vazão, por exemplo, pode estar à frente do pico de concentração de sedimentos e/ou turbidez, ou vice-versa.

As curvas de histerese podem resultar diferentes formas e sentidos. De acordo com Williams (1989), os mais comuns são: laço do sentido horário, do sentido anti-horário e com formato de oito. Estas formas demonstram e caracterizam o comportamento hidrossedimentológico da bacia, através dos hidrogramas e sedimentogramas traçados.

A histerese com sentido horário ocorre quando o pico da vazão acontece após o pico da concentração de sedimentos. Já o sentido anti-horário ocorre em caso contrário, quando o pico da vazão acontece antes do pico da concentração de sedimentos e o formato oito ocorre quando os picos de vazão e da concentração de sedimentos acontecem quase juntos (Figura 1).

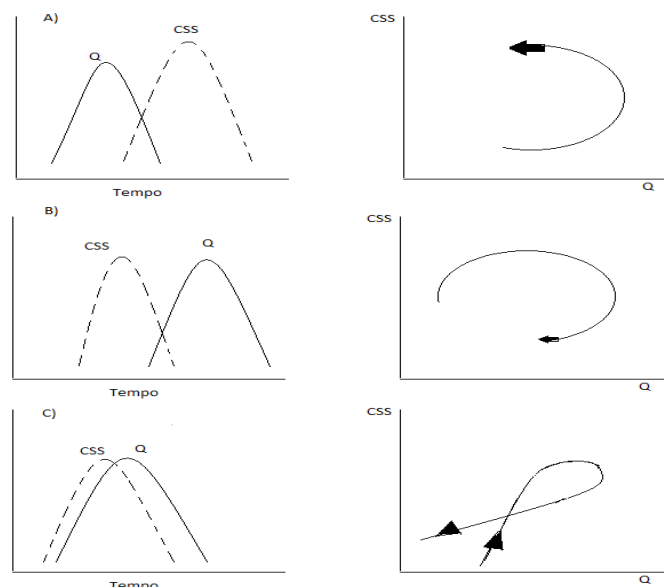


Figura 1 – curvas de histerese ilustrativas, com seus respectivos padrões: a) laço anti-horário; b) laço horário e c) formato oito.

A curva de histerese pode ser determinada pela relação gráfica entre os dados de CSS e/ou turbidez em função dos dados de vazão. A partir dessa curva pode se aplicar uma análise qualitativa, classificando-as conforme proposto por Williams (1989) e uma análise quantitativa calculando um índice de histerese (IH) para verificar, através de um valor numérico, a forma e sentido da curva de histerese. Este IH foi proposto por Lawler *et al.* (2006).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A área de estudo é a bacia hidrográfica do rio Potiribu, localizada na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul, com área de 524,3 Km². A altitude desta região varia entre 420 m a 700 m, com precipitações médias anuais variando de 1000 mm a 2000 mm (Pessoa, 2017). O uso do solo é praticamente agrícola, com mais de 80% da área para cultivos de soja, milho e aveia. O tipo de solo encontrado nesta área é Latossolo vermelho distrófico e Latossolo vermelho distroférico (Streck *et al.*, 2002).

3.2 Monitoramento hidrossedimentológico

A estação fluviométrica de Andorinhas, localizada no exutório da bacia do rio Potiribu, possui dados a partir de março de 2015. Esta estação é equipada com régua linimétrica, e sensores com data logger que registram os dados a cada 10 minutos, sendo eles de nível (Thalimedes-OTT) e de turbidez (turbidímetro DTS-12). Também há na bacia atualmente seis pluviógrafos, que registram as precipitações também a cada 10 minutos. Na seção também são realizadas com ADCP mensalmente medições de vazão e coletas de sedimentos em suspensão por integração na vertical pelo método de Igual Incremento de Largura.

3.3 Avaliação do efeito histerese

Para a realização da análise do efeito histerese foi selecionada uma série de dados de turbidez, que não continham falhas, além de dados de vazão e de precipitação, correspondendo ao período de maio a novembro de 2015, com intervalos de 10 minutos. Foram selecionados para análise 12 eventos ocorridos nesse período. Após, graficou-se uma série com os dados de vazão e de turbidez distribuídas ao longo do tempo para verificar e analisar os eventos ocorridos. Para isso, observou-se as subidas e as descidas das vazões e da turbidez, aplicando-se, para cada evento, as curvas de histerese.

Para análise quantitativa foi utilizada a metodologia descrita por Lawler *et al.* (2006), que quantifica o fenômeno de histerese através das análises do gráfico relacionando os dados de turbidez com os dados de vazão, já traçados na análise qualitativa. O índice de histerese é calculado, portanto, a partir do conhecimento da vazão máxima de cada evento (Q_{MAX}), da vazão mínima inicial do evento

(Q_{MIN}) e da vazão de centro (Q_{cen}), que é a vazão entre a vazão máxima e mínima inicial (equação 1).

$$Q_{cen} = 0,5 * (Q_{MAX} - Q_{MIN}) \quad (1)$$

Após determinar a vazão central é traçada uma linha imaginária desta vazão, no gráfico da turbidez em função da vazão, até o ramo crescente e o decrescente da curva de histerese, obtendo-se, assim, os valores de turbidez no ramo crescente (TURB RC), da turbidez no ramo decrescente (TURB RD), para determinar o índice de histerese (IH).

- para $TURB RC > TURB RD$, utilizar a equação 2:

$$IH = \left(\frac{TURB RC}{TURB RD} \right) - 1 \quad (2)$$

- para $TURB RC < TURB RD$, utilizar a equação 3:

$$IH = \left(\frac{-1}{TURB RC / TURB RD} \right) + 1 \quad (3)$$

O índice de histerese indica que, quanto maior a histerese, maior será o valor de IH. Ele também fornece simetria em toda a faixa de histerese, no sentido horário e no sentido anti-horário. Além disso, seu sinal é consistente com a direção da histerese: o índice assume valores positivos para histerese com laço no sentido horário e valores negativos para histerese no sentido anti-horário. Quando não há ocorrência de histerese, o valor de CSS e/ou turbidez no ramo crescente é igual ao do ramo decrescente, resultando assim um valor de IH igual a zero (Lawler *et al.*, 2006).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No período de maio a novembro de 2015 observou-se 12 eventos, com subidas e descidas, e duração de 131 h a 307 h. Após, foram construídos gráficos para cada evento, com objetivo de verificar e interpretar qualitativamente e quantitativamente o efeito histerese (Figura 2).

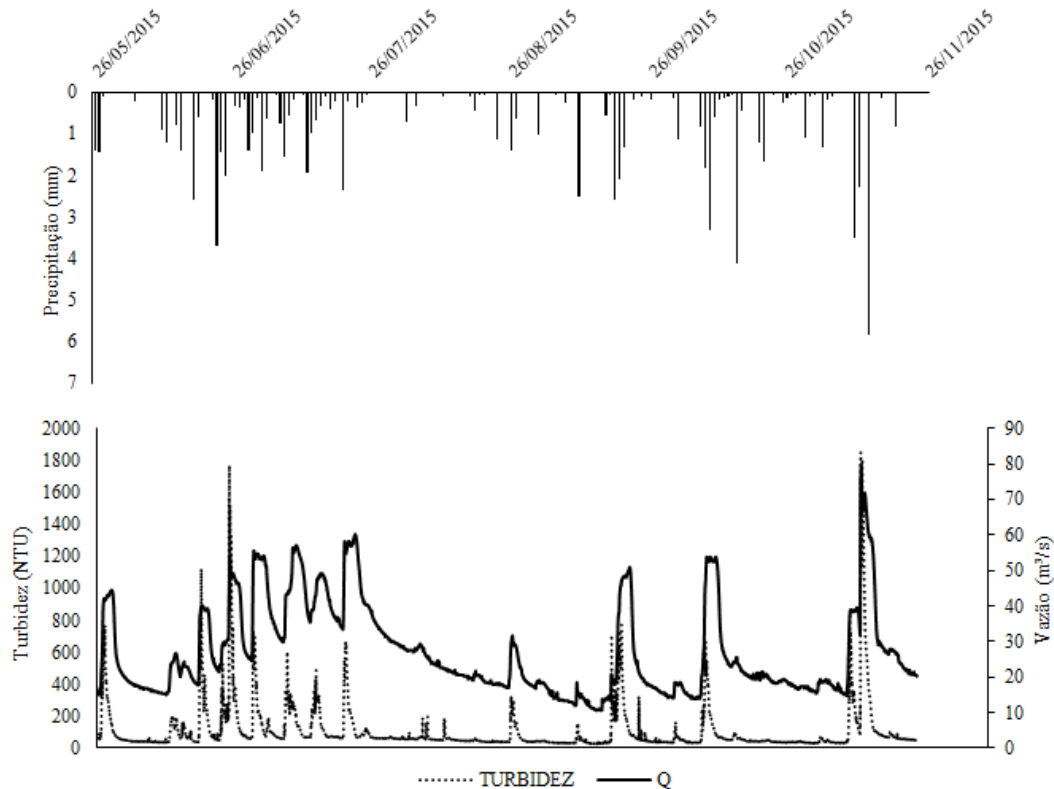


Figura 2 – série de dados no período de maio a novembro de 2015 da estação fluviométrica andorinhas.

Na análise qualitativa do efeito histerese, efetuada a partir do traçado gráfico dos dados de turbidez em função da vazão, observou-se que, na maioria dos eventos, a histerese ocorreu com o padrão no sentido horário, sendo que somente para os eventos dois e quatro foi observado padrão na forma de oito. O laço da histerese no sentido horário é devido aos picos de turbidez ocorrerem antes do pico de vazão, enquanto que, quando o padrão é da forma de oito, os picos de turbidez estão quase ocorrendo em conjunto com os da vazão (Figura 3). Outra característica que pode ser observada para a ocorrência do sentido horário é que no ramo crescente a turbidez é maior do que no ramo decrescente para a mesma vazão. Isto foi comprovado na análise quantitativa do efeito histerese (Tabela 1).

O padrão horário é bastante comum de se encontrar, segundo Williams (1989). Na pesquisa de Minella *et al.* (2011), que em uma bacia rural obtiveram, na maioria dos eventos estudados, padrões de histerese no sentido horário; na pesquisa de Carvalho *et al.* (2017) também encontraram, para a maioria dos eventos estudados, o padrão horário, para aplicações a uma bacia rural no estado do Mato Grosso do Sul. Já na pesquisa de Ziegler *et al.* (2014) os padrões obtidos foram o laço no sentido anti-horário na maioria dos eventos estudados, mas também encontraram em alguns eventos o laço no sentido horário, concluindo que para os eventos que obtiveram a histerese no sentido horário a fonte de sedimentos é advinda do sedimento armazenado no leito de eventos anteriores, por isso o pico de

sedimentos ocorre primeiro do que o da vazão. Segundo Seeger *et al.* (2004), este tipo de curva demonstra que os sedimentos são mobilizados, transportados e depositados rapidamente e que a fonte principal de sedimentos é representada pelos sedimentos que se encontram depositados na calha fluvial e é esgotada com a evolução do evento.

Pela análise das curvas dos eventos analisados nesta pesquisa identifica-se que as principais fontes de contribuição de sedimentos estão bem próximas, sendo as margens do próprio curso d'água que estão erodindo e também podendo ser provenientes das estradas vicinais próximas ao local de medição, que não são asfaltadas, contribuindo com a ocorrência dos sedimentos.

Na análise quantitativa, os índices calculados variaram entre 0,07 a 8 e com sinal positivo, indicando, e confirmando a análise qualitativa, que o sentido da histerese é horário e que o processo predominante é o pico de turbidez antecedendo o pico de vazão (Tabela 1).

Na pesquisa de Carvalho *et al.* (2017) encontraram IH variando de 1,18 a 2,74 com predomínio também no sentido da histerese horário e com picos de CSS antecedendo o pico de vazão. Na de Minella *et al.* (2011) os valores dos índices variaram de -0,12 a 12,63 obtendo também para a maioria dos eventos o sentido horário.

Tabela 1 – Resultados da análise quantitativa do efeito histerese para os eventos selecionados no período de maio a novembro de 2015.

Evento	Período do evento		Tempo (h)	Precipitação (mm)	Q _{máx.} (m ³ /s)	Q _{mín.} (m ³ /s)	Q _{cen} (m ³ /s)	TURB RC (NTU)	TURB RD (NTU)	IH	Histerese
	Data início	Data fim									
1	26/05/2015	06/06/2015	244,17	27,18	44,47	15,33	29,90	340	80	3,25	H
2	10/06/2015	14/06/2015	73,33	23,07	26,70	15,92	21,31	85	60	0,42	8
3	17/06/2015	22/06/2015	131	22,53	40,10	17,96	29,03	240	80	2,00	H
4	24/06/2015	27/06/2015	63,66	19,57	54,09	30,49	42,29	1080	120	8,00	8
5	29/06/2015	06/07/2015	167,33	59,80	55,55	24,66	40,10	480	120	3,00	H
6	06/07/2015	12/07/2015	144	38,90	57,00	29,90	43,45	320	70	3,57	H
7	13/07/2015	20/07/2015	168	26,18	49,14	33,98	41,56	260	70	2,71	H
8	20/07/2015	25/07/2015	140	44,90	60,21	33,40	46,80	300	80	2,75	H
9	26/08/2015	31/08/2015	120	21,00	31,65	17,08	24,37	80	75	0,07	H
10	19/09/2015	30/09/2015	264	45,85	50,88	15,62	33,25	330	80	3,13	H
11	06/10/2015	19/10/2015	312	70,93	53,80	13,88	33,84	260	80	2,25	H
12	13/11/2015	18/11/2015	307,33	48,25	79,73	20,29	50,01	640	120	4,33	H

O menor valor encontrado para o IH foi de 0,07 no evento nove, pode-se observar que neste evento a variação da turbidez no ramo crescente foi de 80 NTU e para o ramo decrescente foi de 75 NTU sendo uma pequena diferença (5 NTU) e verificando que o valor do ramo crescente a turbidez é maior que o ramo decrescente. Assim, demonstrando que o sentido da curva de histerese é horário.

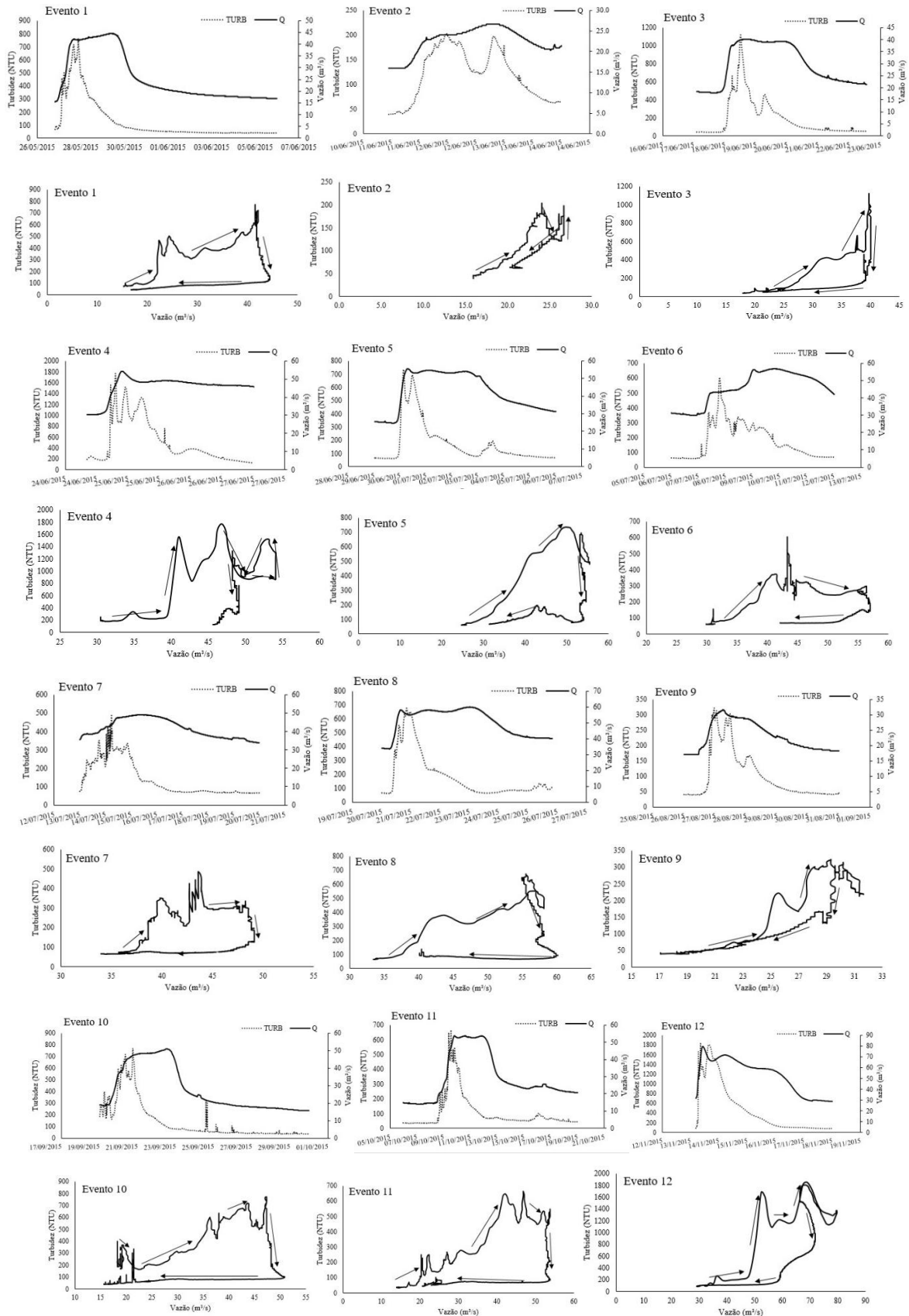


Figura 3 – Hidrogramas, sedimentogramas e respectivas curvas de histerese para os 12 eventos selecionados no período de maio a novembro de 2015.

Na figura 3 observou-se também o comportamento dos hidrogramas e sedimentogramas ao longo do evento onde se pode analisar o pico de turbidez ocorrer um pouco antes do pico da vazão, resultando em um sentido horário.

O maior índice foi o do evento quatro com IH igual a 8, pode-se verificar que a turbidez no ramo crescente foi maior e com valor igual a 1080 NTU e no ramo decrescente foi de 120, obtendo uma maior diferença entre os valores (960 NTU). E na análise qualitativa dos hidrogramas e sedimentogramas verificou-se que os picos de turbidez e de vazão estão quase no mesmo tempo indicando o formato da curva de histerese em 8. Diferente do valor de IH encontrado por Minella et al. (2011) para o mesmo formato de histerese (forma de 8) foi de -0,12 e com CSS no ramo crescente menor do que o ramo decrescente com diferença de -0,255 entre eles.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia adotada para a caracterização da produção de sedimentos na bacia em estudo demonstra-se confiável e adequada para ser utilizada com os dados de turbidez em substituição aos dados de concentração de sedimentos em suspensão. Isto só foi possível porque a turbidez é uma variável que apresenta alta correlação com a concentração de sedimentos em suspensão. Assim sendo, comprovou-se ser viável a sua utilização para este fim.

A análise qualitativa e a análise quantitativa de histerese identificaram um padrão no sentido horário para a maioria dos eventos estudados, um índice de histerese variando de 0,07 a 8, e turbidez no ramo crescente maior que no ramo decrescente para uma mesma vazão.

Esta análise do efeito histerese é capaz de caracterizar como ocorrem os processos de produção de sedimentos e qual a sua principal fonte de contribuição. Assim, para esta bacia em estudo, as contribuições de sedimentos se caracterizam por existência de fontes próximas, advindas principalmente de sedimentos depositados nas calhas do rio (provenientes de eventos ocorridos anteriormente), das margens dos rios e possível contribuição das estradas vicinais próximas do local de medição.

REFERÊNCIAS

CARVALHO, G. A. et al. (2017). *“Produção de sedimentos e efeito histerese na concentração de sedimentos”* in Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos de Santa Catarina, Florianópolis.

LAWLER, D. M. et al. (2006). *“Turbidity dynamics and hysteresis patterns during spring storm events in an urban headwater system: The Upper Tame, West Midlands, UK”*. Science of the Total Environment 360, p.109-126.

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

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; MAGNAGO, P. F. “*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.

PESSOA, M. L. (2017). “*Clima do RS*” in Atlas FEE. Porto Alegre: FEE, 2017. Disponível em: <<http://atlas.fee.tche.br/rio-grande-do-sul/socioambiental/clima/>>. Acesso em: 27 de abril de 2019.

SEEGER, M. *et al.*, (2004). “*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 288, pp.299-311.

STRECK, E.V. *et al.* (2012). “*Solos do Rio Grande do Sul*”. Emater-RS/UFRGS - Porto Alegre – RS, 126p.

ZIEGLER, A. D. *et al.* (2014). “*Turbidity-based sediment monitoring in northern Thailand: Hysteresis, variability, and uncertainty*”. Journal of Hydrology 519, pp. 2020–2039.

WILLIAMS, G. P. (1989). “*Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers*”. Journal of Hydrology 111, pp.89-116.