



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO CEDETEG  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS – SEAA/G  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA – PPGG**



**FERNANDA BORTOLATTO**

**CARACTERÍSTICAS DA RELAÇÃO CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTO  
SUSPENSO E VAZÃO EM BACIA RURAL NO MUNICÍPIO DE GUARAPUAVA-  
PR**

**GUARAPUAVA, 2015**

**FERNANDA BORTOLATTO**

**CARACTERÍSTICAS DA RELAÇÃO CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTO  
SUSPENSO E VAZÃO EM BACIA RURAL NO MUNICÍPIO DE GUARAPUAVA-  
PR**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em Geografia (Área de Concentração: Dinâmica da Paisagem e Geomorfologia e Análise Ambiental).

**Orientador:** Prof. Dr. Edivaldo Lopes Thomaz

**Coorientador:** Prof. Dr. Leandro Redin Vestena

**GUARAPUAVA, 2015**

Catálogo na Publicação  
Biblioteca Central da Unicentro, Campus Cedeteg

B739c Bortolatto, Fernanda  
Características da relação concentração de sedimento suspenso e vazão em bacia rural no município de Guarapuava-PR / Fernanda Bortolatto. – – Guarapuava, 2015  
xv, 61 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Geografia, área de concentração em Análise da Paisagem e dos Espaços Rurais e Urbanos, 2015

Orientador: Edivaldo Lopez Thomaz

Co-orientador: Leandro Redin Vestena

Banca examinadora: Sílvio Carlos Rodrigues, Valdemir Antoneli

Bibliografia

1. Geografia. 2. Modelagem fluviossedimentológica. 3. Características físicas da chuva. 4. Rede de drenagem. 5. Classificação qualitativa e quantitativa da histerese. I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em Geografia.

CDD 551.48



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO CEDETEG  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS – SEAA/G  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA - PPGG



### TERMO DE APROVAÇÃO

**FERNANDA BORTOLATTO**

CARACTERÍSTICAS DA RELAÇÃO DE CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTO  
SUSPENSO E VAZÃO EM BACIA RURAL NO MUNICÍPIO DE GUARAPUAVA-PR

Dissertação **APROVADA** em 16/03/2015 como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Geografia, na área de concentração Dinâmica da Paisagem e dos Espaços Rurais e Urbanos, da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. Edivaldo Lopes Thomaz – presidente  
Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO)

Prof. Dr. Valdemir Antoneli  
Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO)

Prof. Dr. Silvio Carlos Rodrigues  
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Fernanda Bortolatto

Guarapuava (PR), 16 de março de 2015.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, de modo especial: aos meus pais Dalva e Valdenir, que sempre me incentivaram e me apoiaram em todas as situações, sendo minha base e meu alicerce na busca pelo conhecimento, pela verdade e fé. E a todos meus familiares que de uma forma ou de outra, foram fundamentais para que eu chegasse até aqui e me tornasse o que sou.

## AGRADECIMENTOS

Nesta pesquisa de mestrado mesmo com muito trabalho, dedicação e dificuldades tenho que citar alguns nomes que foram cruciais para desenvolvimento da mesma.

Primeiramente a Deus pela vida, e por seu amor para comigo, pois foi a força divina que nos momentos de solidão e abatimento me levantava, e me revestir diariamente com sua armadura de força e poder, me colocava firme e cingida com a verdade, me revestia com a couraça da justiça, calçada os pés na preparação do evangelho da paz, tomada do escudo da fé, do capacete da salvação, da espada do Espírito que é a palavra de Deus, da súplica por todos os santos e a perseverança (Efésios 6: 13-18).

Meu agradecimento especial ao Prof. Dr. Edivaldo Lopes Thomaz, por aceitar me orientar no Mestrado, pela motivação durante a pesquisa, principalmente o incentivo na época da mudança do projeto, por sua confiança no trabalho, profissionalismo e por toda assistência durante esse tempo.

Agradeço ao Prof. Dr. Leandro Redin Vestena, por ter aceitado me coorientar na mudança do meu projeto de mestrado, por estar sempre à disposição com paciência e colaboração, pela orientação na seleção dos eventos fluviossedimentológicos, sem contar a dedicação e as dicas na supervisão de estágio de docência e amizade.

Agradeço o Prof. Dr. Nelson Vicente Lovatto Gasparetto - UEM, por ter acreditado em mim e por me apresentar as portas do caminho científico.

Agradeço a toda direção e coordenação da pós-graduação do Mestrado em Geografia da Unicentro, e em especial aos professores que tive oportunidade de conviver durante a participação de suas aulas, Prof. Dr. Luiz Gilberto Bertotti, Prof. Leandro Redin Vestena, Prof. Edivaldo Lopes Thomaz, Prof. Dr. Marquiana Freitas Vilas Boas Gomes, Prof. Dr. Aparecido Ribeiro de Andrade e Prof. Dr. Sergio Fajardo.

Ao secretário Alceu da Pós Graduação Mestrado em Geografia, por toda paciência, prontidão em nos atender e amizade.

Agradeço ao mestrando Rafael Adriano Castro pela colaboração e auxílio com os mapas, ajuda no trabalho de campo e amizade.

Aos meus pais Dalva Garbeline Bortolatto e Valdenir Bortolatto meus sinceros agradecimentos, pela serenidade e paciência para comigo nesse período de ausência.

Ao meu irmão Leonardo Bortolatto, meu muito obrigada, por sempre me apoiar, mesmo na distância e na saudade, nunca deixou de me incentivar e dar força para que eu buscasse meus objetivos, agradeço à Deus por sus existência todos os dias.

Meus sinceros agradecimentos ao meu querido esposo Eduardo do Carmo, pelo incentivo, companheirismo, carinho, paciência com minhas ausências e distância, e pelo apoio em todas as etapas desse trabalho, em especial pela ajuda com o abstract.

Gostaria de agradecer aos irmãos que a vida me proporcionou escolher, devo chamá-los de amigos: Kathiuscia, Juliana, Adriana, Maria Eliza, Robson, Vanessa, Peter e aos meus padrinhos Gleice e Vinícius (Dunga).

Agradeço a todos meus colegas de trabalho da Fundação Parque tecnológico de Itaipu (FPTI), pelo incentivo e paciência nessa etapa da minha vida.

Agradeço a todos meus amigos de Guarapuava e de Umuarama, em especial a Diane e Thais que me acolheram em sua casa.

Meu obrigada aos meus amigos de Foz do Iguaçu e aos irmãos do Grupo de oração João Paulo II, por suas orações e motivação.

Não poderia de deixar de agradecer a novas amigades que construí ao longo desse período: Daniele Hort, Thais Meia Casa, Reginaldo Lima Correa, Andressa Consalter, Cristiane Freitas, Paulo Ângelo Fachin, Maricler Wollinger Kovalczuk e Gilmar Zakrzewski.

Meu eterno obrigada a meus familiares: Bortolatto, Garbeline, Pinhal, e do Carmo, a todos agradeço por sempre estarem ao meu lado e me incentivarem.

Agradeço a colaboração dos professores que compôs a banca de qualificação e a banca da defesa final do mestrado, Prof. Dr. Adalto G. de Lima, Prof. Dr. Valdemir Antoneli, Prof. Dr. Silvio Carlos Rodrigues e meus orientadores.

E a todos que mesmo não citados, mas foram fundamentais de alguma forma para que eu chegasse até aqui, meu muito obrigada.

Que Deus os abençoe por tudo!!!

“Dê-me, Senhor, agudeza para entender, capacidade para reter, método e faculdade para aprender, sutileza para interpretar, graça e abundância para falar. Dê-me, Senhor, acerto ao começar, direção ao progredir e perfeição ao concluir”.

Dr. São Tomás de Aquino

## SUMÁRIO

## INTRODUÇÃO

<b>1. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>03</b>
<b>1.1 Efeito Histerese da relação Concentração de sedimento suspenso e Vazão .....</b>	<b>03</b>
<i>1.1.1 Condições antecedentes .....</i>	<i>05</i>
<b>2. Dinâmica fluviossedimentológica .....</b>	<b>06</b>
<b>2.1 Relação dos processos erosivos e a precipitação .....</b>	<b>07</b>
<b>2.2. Características físicas da chuva.....</b>	<b>08</b>
<b>2.3 A produção de Sedimento.....</b>	<b>10</b>
<i>2.3.1 Concentração de sedimento em suspensão.....</i>	<i>10</i>
<b>3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>14</b>
<b>3.1 Clima.....</b>	<b>14</b>
<b>3.2 Litologia, relevo e solo .....</b>	<b>16</b>
<b>3.3 Vegetação .....</b>	<b>16</b>
<b>4. MATERIAIS e MÉTODOS .....</b>	<b>18</b>
<b>4.1 Medidas da Dinâmica Fluviossedimentológica .....</b>	<b>19</b>
<i>4.1.1 Medidas pluviométricas .....</i>	<i>20</i>
<i>4.1.2 Medidas da concentração de sedimento suspenso.....</i>	<i>20</i>
<i>4.1.3 Medidas de Vazão.....</i>	<i>21</i>
<i>4.1.4 Análise qualitativa da histerese.....</i>	<i>22</i>
<i>4.1.5 Análise quantitativa da histerese.....</i>	<i>23</i>
<b>4.2 Análise da relação concetração de sedimento suspenso, precipitação e vazão .....</b>	<b>24</b>
<b>4.3 Mapeamnto da área de estudo.....</b>	<b>24</b>
<b>5. RESULTADO e DISCUSSÕES .....</b>	<b>24</b>
<b>5.1 Mapeamnto do uso da terra.....</b>	<b>25</b>
<b>5.2 Dinâmica fluviossedimentológica .....</b>	<b>28</b>
<i>5.2.1 Histerese single – valued line .....</i>	<i>31</i>
<i>5.2.2 Histerese clockwise loop .....</i>	<i>31</i>
<i>5.2.3 Histerese counterclockwise loop .....</i>	<i>32</i>
<i>5.2.4 Histerese single line plus loop.....</i>	<i>33</i>
<i>5.2.5 Histerese figure eight.....</i>	<i>34</i>

<b>6. CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTO SUSPENSO E AS CARACTERÍSTICAS DA CHUVA .....</b>	<b>36</b>
<b>6.1 Relação da concentração de sedimento suspenso, precipitação e vazão.....</b>	<b>38</b>
<b>6.1.1 Histerese single – valued line.....</b>	<b>39</b>
<b>6.1.2 Histerese clockwise loop .....</b>	<b>39</b>
<b>6.1.3 Histerese counterclockwise loop .....</b>	<b>41</b>
<b>6.1.4 Histerese single line plus loop.....</b>	<b>41</b>
<b>6.1.5 Histerese figure eight.....</b>	<b>42</b>
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>44</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>46</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1: Ilustração da dinâmica de transporte de sedimento .....</b>	<b>12</b>
<b>Figura 2: Bacia hidrografica do rio Guabiroba e localização da estação fluviossedimentológica .....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 3: Carta de rede drenagens e estradas rurais da bacia hidrográfica do rio Guabiroba .....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 4: Pluviógrafo e estação fluviossedimentológica do rio Guabiroba .....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 5: Análise qualitativa da histerese .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 6: Esquema dos modelos de relação entre <math>C_{ss}</math> e <math>Q</math> representados pela curva de histerese .....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 7: Carta de uso da terra da bacia hidrográfica do rio Guabiroba .....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 8: Evento 6 – (a) Hidrograma e sedimentograma, e (b) hidrossedimentograma - relação entre <math>Q</math> observada e <math>C_{ss}</math> monitorada em intervalo de tempo (15min).....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 9: Evento 14 – (a) Hidrograma e sedimentograma, e (b) hidrossedimentograma - relação entre <math>Q</math> observada e <math>C_{ss}</math> monitorada em intervalo de tempo (15min) .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 10: Evento 11 – (a) Hidrograma e sedimentograma, e (b) hidrossedimentograma - relação entre <math>Q</math> observada e <math>C_{ss}</math> monitorada em intervalo de tempo (15min) .....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 11: Evento 18 – (a) Hidrograma e sedimentograma, e (b) hidrossedimentograma - relação entre <math>Q</math> observada e <math>C_{ss}</math> monitorada em intervalo de tempo (15min) .....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 12: Evento 03 – (a) Hidrograma e sedimentograma, e (b) hidrossedimentograma - relação entre <math>Q</math> observada e <math>C_{ss}</math> monitorada em intervalo de tempo (15min).....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 13: Escoamento superficial e estrada rural e entrada desedimento no córrego, na BHRG .....</b>	<b>38</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1: Área da bacia hidrográfica do rio Guabiroba em cada classe de uso do solo em (há) e (%) .....</b>	<b>24</b>
<b>Tabela 2: Seleção de eventos referente a precipitação, vazão, concentração de sedimento em suspensão, na bacia hidrográfica do rio Guabiroba .....</b>	<b>26</b>
<b>Tabela 3: Índice de coeficiente de determinação da <math>C_{ss}</math> versus vazão, na ascensão e recessão do hidrograma, para eventos monitorados na bacia hidrográfica do rio Guabiroba.....</b>	<b>27</b>
<b>Tabela 4: Resultado das variáveis hidrossedimentológicas e da histerese, para eventos monitorados na bacia hidrográfica do rio Guabiroba.....</b>	<b>28</b>
<b>Tabela 5: Resultado das classe da curva de histerese, dos tipos e algumas características de precipitação dos eventos monitorados na bacia hidrográfica do rio Guabiroba.....</b>	<b>35</b>

## APÊNDICES

<b>APÊNDICE A: HISTERESE <i>SINGLE –VALUED LINE</i></b> .....	<b>50</b>
<b>APÊNDICE B: HISTERESE <i>CLOCKWISE LOOP</i></b> .....	<b>50</b>
<b>APÊNDICE C: HISTERESE <i>COUNTERCLOCKWISE LOOP</i></b> .....	<b>53</b>
<b>APÊNDICE D: HISTERESE <i>SINGLE – LINE PLUS LOOP</i></b> .....	<b>54</b>
<b>APÊNDICE A: HISTERESE <i>FIGURE EIGHT</i></b> .....	<b>55</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
C <sub>ss</sub>	Concentração de sedimento em suspensão	mg.L
Q	Vazão	m <sup>3</sup> /s
IH	Índice de Histerese	-----
TDE	Tempo de duração do evento	h
TDP	Tempo de precipitação	h
P	Precipitação	mm/h
P <sub>ant</sub>	Precipitação anterior ao evento	mm/h
P <sub>total</sub>	Precipitação total do evento	mm/h
P <sub>máx.</sub>	Precipitação máxima do evento	mm/h
r <sup>2</sup>	Coefficiente de determinação	%
IM	Intensidade média	mm/h

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar a relação da concentração de sedimento suspenso e a vazão, a partir da classificação e análise quantitativa das curvas de histerese, durante eventos de precipitação na bacia hidrográfica do rio Guabiroba, na área rural de Guarapuava – PR. As características das curvas de histerese que foram obtidas na bacia hidrográfica, estão ligadas a duas origens, sendo a primeira a erosão das vertentes e a segunda à erosão das margens fluviais e o leito em relação a vazão. Levando em consideração esse conhecimento, as classes de histereses foram avaliadas segundo Williams (1989), e as características da chuva foram calculadas de acordo Richardt (1986), e diante disso foi analisado a influência das características da precipitação na taxa fluviossedimentológica no canal de drenagem. Os vinte eventos selecionados, foram classificados em: apenas um evento na classe I de histerese *single-valued line*, sete eventos da classe II de histerese *clockwise*, dois eventos da classe III de histerese *single line – plus loop*, dois eventos da classe VI de histerese *counterclockwise* e oito eventos da classe V de histerese *figure eight*. O índice histerese – IH, foi calculado conforme Lawler *et al.*(2006), e confirmou a análise qualitativa da histerese realizadas nos vinte eventos. O coeficiente de de determinação ( $r^2$ ), apresentou resultados significativos em dois eventos, no evento 6, que obteve  $r^2 = 0,99$ , de coeficiente de determinação entre  $C_{ss}$  versus  $Q$ ; e no evento 12 com  $r^2 = 0,0$ , que não apresentou relação alguma entre  $C_{ss}$  e  $Q$ . A influência de outros fatores, como as características de precipitação podem ter desencadeado novas áreas fontes de sedimento, e por consequência disso, modificou a relação de  $C_{ss}$  e  $Q$ , com mais ou menos sedimento sendo deslocado para o canal de drenagem.

**Palavras-chave:** modelagem fluviossedimentológica, características físicas da chuva, rede de drenagem, classificação qualitativa e quantitativa da histerese.

## ABSTRACT

The main purpose of this work is investigate the relation between concentration of suspended sediment and the water flow through a classification and a quantitative analysis of the diverse hysteresis loops obtained during precipitation events in the Guabiroba river's hydrographic basin located in the rural area of the city of Guarapuava - PR. The features of the obtained hysteresis loops are linked to two origins, the first one is the erosion of the slopes and the second one are the erosion of the river bank and riverbed due the flow. Through this knowledge, the classes of hysteresis loops were studied in accordance to Williams (1989), and the rains' features were calculated through Richardt (1986), what allowed obtain the influence of the features of the precipitation in the fluvio sedimentological rate in the drainage channels. The twenty selected events were classified as follows: as only one event belongs to the hysteretic loop type I (single-valued line); there are six events to the hysteretic loop type II (clockwise loop); there are two events of the hysteretic loop type III (single line – plus loop); there are two events of the hysteretic type IV (counterclockwise) and there are seven events of the hysteretic type V (figure eight). The hysteresis indice  $I_H$ , was obtained according to Lawler et al. (2006), and endorsed the qualitative analysis of the hysteresis loop performed in the twenty events. The correlation coefficient ( $R^2$ ), presents two significant results, the first one was the number 12 event, with  $R^2 = 0,99$  of correlation  $C_{ss}$  vs.  $Q$ ; and the second one was the number 6 event, with  $R^2 = 0,0$ , which means no correlation between  $C_{ss}$  and  $Q$ . The influence of others factors, like the characteristics of the precipitations, may have triggered new areas of sources of sediments, as consequence modified the relation  $C_{ss}$  Vs.  $Q$ , with more or less sediment moved to the drainage channel.

**Key-words:** sedimentology river modeling, physical characteristics of the rain, drainage network, qualitative and quantitative assessment of the hysteresis.

## INTRODUÇÃO

Na bacia rural do rio Guabiroba, localizado no município de Guarapuava- PR, foi analisado em vinte eventos de chuva a dinâmica da vazão (Q) e concentração de sedimento suspenso (C<sub>ss</sub>) fluvial, a partir das características da histerese. A histerese representa o resultado da relação entre Q e C<sub>ss</sub>, (KLAR, 1984). Para isso foi considerado na análise a dinâmica dos processos erosivos e da produção de sedimentos.

Os estudos caracterizando os sedimentos na geomorfologia são determinantes para a interpretação da dinâmica do relevo e conseqüentemente da análise evolutiva da paisagem. As características fluviais (C<sub>ss</sub> e Q), são de grande importância no que concerne aos recursos hídricos, apresentando contribuições do ponto de vista da hidráulica e do controle da erosão (SUGUIO e BIGARELLA, 1990).

Os processos erosivos estão relacionados com o uso do solo na bacia e com o grau de controle sobre as fontes de poluição, que comprometem a qualidade da água nos cursos fluviais que compõem uma bacia hidrográfica (TUCCI,1993). A água transporta substâncias e organismos, fruto de onde passou de acordo com Azevedo Netto, (1991), para Bortoluzzi e Petry (2008), no transporte dos sedimentos são levados elementos como insumos agrícolas (xenobiontes), que alteram a qualidade ambiental, poluindo os cursos fluviais e afetando as características físico/químico, que são naturais do ambiente. Essa afirmação é confirmada por Brooks *et al.*(1991) e Ward & Elliot (1995), o sedimento é um elemento significativo em relação a todos os poluentes em termos de sua concentração na água, por seus impactos no uso da água e seus efeitos no transporte de outros poluentes.

A produção de sedimento está estreitamente relacionada com a precipitação, pois o impacto da gota da chuva possui um papel importante na desagregação do solo (MORGAN, 2005). Carvalho (1994) relacionou a produção de sedimento com a precipitação, e concluiu que em períodos de intensa precipitação a quantidade de concentração de sedimento no canal fluvial pode representar uma média de 70 a 90% do total de um ano (histórico anual) hidrológico. Sendo que nos estudos de Christofolletti (1981), a carga de sedimento transportado em canal fluvial em eventos pode chegar a 99%. Segundo Beuselinck *et al.* (2000), durante os períodos de chuvas intensas parte do sedimento que é produzido é parcialmente depositado na bacia e a outra parte considerável é transportado pelo sistema de drenagem.

O presente trabalho possui como principal objetivo “Avaliar as características de histereses em uma bacia hidrográfica, na área rural do município de Guarapuava- PR.” E

para cumprir tal objetivo, foram realizados a análise de coeficiente de determinação da concentração de sedimento em suspensão ( $C_{ss}$ ) em relação a vazão ( $Q$ ), durante eventos de chuva, considerando a precipitação ( $P$ ) e suas características físicas como duração e intensidade média.

O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do rio Guabiroba (BHRG), na área rural do município de Guarapuava. Sendo a BHRG uma bacia experimental do grupo de pesquisa em hidrogeomorfologia do curso de Geografia, da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), no qual realizam pesquisas a mais de 10 anos na área. Este trabalho buscou dar continuidade aos já desenvolvidos pelo grupo de pesquisa, utilizando o seu banco de dados fluviossedimentológico e de precipitação oriundos de projetos anteriores.

Foi realizado em 20 eventos de precipitação de chuva do período de 2009 e 2010, a classificação e a quantificação do efeito histerese que ocorre entre a vazão e a concentração de sedimento suspenso, como também a análise dos índices de histerese e dos fatores que os controlam. Essa análise buscou caracterizar a histerese qualitativamente e aplicar um índice quantitativo que permitisse a comparação entre eventos e as características da bacia hidrográfica. E para melhor entendimento da variabilidade entre  $C_{ss}$  x  $Q$ , foram elaborados os hidrogramas e sedimentogramas que possibilitou a análise dessas variáveis de forma representativa.

A presente dissertação está organizada conforme a estrutura: o capítulo 1 e 2 apresenta o fundamentação teórica da pesquisa; o capítulo 3 caracterização da área, no capítulo 4 contém a metodologia empregada na investigação; o capítulo 5 e 6 engloba os resultados e discussões, o capítulo 7 contém as conclusões e pôr fim a bibliografia utilizada.

## 1. REFERENCIAL TEÓRICO

### 1.1 Efeito histerese na relação entre a concentração de sedimento suspenso e a Vazão

O diagnóstico do comportamento hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica, pode ser determinado levando em consideração a análise da relação entre concentração de sedimento suspenso e a vazão, a forma do sedimentograma e do hidrograma.

A relação da vazão – Q e a concentração de sedimento suspenso – C<sub>ss</sub>, sendo representada em gráfico torna possível a evidencia do efeito da histerese, sendo essa caracterizada como um atraso na evolução de um fenômeno físico em relação ao outro (KLEIN, 1984; WILLIAMS, 1989; JANSSON, 2002; STOTT, 2006; LEFRANCOIS *et al.*, 2007).

A relação de um fenômeno físico com outro (Q x C<sub>ss</sub>), que caracteriza a histerese, representa a variação de uma determinada vazão para uma C<sub>ss</sub>. Pois em vazões baixas normalmente são transportados os sedimentos mais finos, enquanto que em altas vazões, quando o rio atinge velocidades maiores, são transportados os sedimentos mais grosseiros. Esse processo durante os eventos de chuva, apresenta falta de sincronia na dinâmica da Q e da C<sub>ss</sub>, como resultado do atraso entre os fenômenos físicos (WILLIAMS, 1989; SEEGER *et al.*, 2004; ZABALETA *et al.*, 2007; NADAL-ROMERO *et al.*, 2008; MINELLA *et al.*, 2011). Para Jansson (2002), não existe uma relação única entre vazão e concentração de sedimento suspenso, portanto para a mesma medida dos picos de vazão geralmente obtêm-se valores diferentes uns dos outros medidos para a concentração de sedimento suspenso. Diante disso torna-se necessário o cálculo de coeficiente de determinação ( $r^2$ ) entre essas variáveis (Q – C<sub>ss</sub>), pois com os valores de cada alteração entre as variáveis é possível caracterizar a dinâmica hidrológica de uma determinada bacia hidrográfica.

Segundo Martins e Coiado (1999), em seu estudo realizado em uma pequena bacia rural, considerou significativa o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) entre a concentração dos sedimentos suspensos e a vazão, esses resultados foram obtidas por meio da coleta de dados durante a estação seca e nos eventos hídricos na época chuvosa. Na estação seca as coletas foram realizadas com o objetivo de avaliar os parâmetros nas condições de vazões mínimas e sem erosão, quando o escoamento básico alimenta o fluxo, esses resultados servem de parâmetro para comparar com os dados obtidos na época de chuva. A representação do

coeficiente de determinação ( $r^2$ ) entre Q e C<sub>ss</sub>, forma uma curva denominada efeito histerese, que permite a análise qualitativa e quantitativa da histerese.

A análise qualitativa realizada por Williams (1989), identificou e classificou cinco tipos comuns de curva de histerese, que podem ser caracterizadas em valor simples (*single-valued*), sentido horário (*clockwise*), sentido anti-horário (*counterclockwise*), linha simples comum (*single line plus*) e figura oito (*figure eight*). Segundo a classificação de Williams (1989), seguido dos estudos de Jansson (1995), Lenzi e Marchi (2000) Seeger *et al.*, (2004) e Baca (2008), analisaram os tipos de curva de histerese em diferentes situações e obtiveram em seus trabalhos especificações das relações entre as variáveis Q – C<sub>ss</sub>, cujas informações seguem resumidas e agrupadas sobre os cinco tipos de curva: (1) *Single-valued* – essa curva é obtida quando o pico da relação entre a concentração de sedimento em suspensão e o fluxo de fluido é simultâneo. Este tipo de histerese corresponde à relação simples quando mostra uma proporcionalidade direta entre as duas variáveis. (2) *Clockwise* – é o tipo de curva mais estudado de histerese e ocorre quando o pico do sedimentograma ocorre antes do hidrograma. (3) *Counter clockwise* – é a situação oposta do sentido horário, isto é, o pico de sedimentograma ocorre após o do hidrograma, formando uma curva com início e término em sentido anti-horário. (4) *Single line plus* – uma curva não muito estudada, uma vez que parece muito raramente na natureza. Esta histerese é linear para um determinado escoamento de fluido que se torna uma relação circular para maiores taxas de fluxo. A curva de histerese (5) *Figure eight* – possui baixa frequência e ocorre em situações semelhantes as curvas horárias e anti-horárias. São desenvolvidas pela relação de Q e C<sub>ss</sub>, iniciando a curva no sentido horário e terminando no sentido anti-horário, ou em ordem inversa, que culminou com valores que respondem de forma diversificada, apresentando dois picos de C<sub>ss</sub>.

Os tipos de curva de histerese são influenciados pelo tamanho da bacia hidrográfica, quantidade de chuva, umidade do solo e das condições antecedentes do evento (Seeger *et al.*, 2004). Segundo Picouet *et al.* (2001) e Nondin Jr., (1985), as curvas de histerese são causados, entre outras razões, pela variação da quantidade de material disponível para erosão, e diante desse conhecimento as curvas-chave são modelos empíricos muito simples e incapazes de descrever tais variações. Pois assumem a hipótese de que o transporte de sedimento não depende somente da capacidade do curso d'água de erodir as margens, o leito e de transportar os materiais, mas também da disponibilidade de sedimentos na bacia. Considera-se que essa disponibilidade diminui durante a cheia, e isso descreve o processo fluviossedimentológico sendo dinâmico e relacionado a outros fatores.

Segundo Lopes *et al.* (2007), a relação existente entre a vazão e a concentração de sedimentos, normalmente, não é homogênea durante o evento, apresentando um comportamento complexo denominado histerese. A histerese reflete a complexidade dos picos de Q e C<sub>ss</sub> que não coincidem, como também acontece com as taxas de ascensão e decréscimo, ou seja, o aparecimento de um atraso na evolução de um fenômeno físico em relação a outro, no qual é denominado de histerese (Klar, 1984).

Portanto a histerese reflete a complexidade da relação vazão e concentração de sedimento em suspensão, e sua variabilidade é determinada pelas condições que o ambiente oferta, como o tipo do solo e seu uso relacionado aos padrões pluviométricos, localização das fontes ativas de sedimento e a distância do núcleo de precipitação e inclinação média da bacia (JANSSON, 1995; LENZI e MARCHI, 2000).

Esta complexidade afeta diretamente a capacidade de calibração e validação de modelos matemáticos (LOPES, 2007). O cálculo do índice de histerese – IH, possibilita quantificar a magnitude e determinar a direção da histerese sentido *clockwise*, sentido *conter clockwise* e *figure eight*. Para obter o IH, utiliza-se o cálculo da histerese a partir da curva que representa a variação da concentração de sedimentos versus a vazão no espaço de tempo. Os resultados mostram o cálculo da histerese para eventos com diferentes condições de uso e manejo do solo e discute os fatores controladores da relação entre a vazão e a concentração de sedimentos suspenso (LOPES, 2007).

Na análise dos gráficos de Q x C<sub>ss</sub>, podem ocorrer em duas situações mais comuns, quando o pico da concentração de sedimentos ocorre normalmente na fase descendente da hidrógrafa, ou no seu pico, entretanto algumas vezes ele pode acontecer na fase descendente da hidrógrafa, portanto, os laços de histerese podem ocorrer em diferentes direções, descrevendo as relações entre vazão e a concentração de sedimentos em diferentes eventos (JANSSON, 1995). Os hietogramas, hidrogramas e sedimentogramas representam a realidade do ambiente naquele instante em que foi medido, portanto para Hasnain e Thayyen, (1999), as condições locais, como natureza geológica, tipo de uso da terra, relevo, tipo de solo e clima exercem significativo efeito no regime hidrossedimentológico. E as principais variáveis envolvidas nos processos hidrossedimentológicos são precipitação, vazão, concentração de sedimento em suspensão e descarga de sedimentos de arraste e essas são influenciadas pelas condições antecedentes do evento (MINELLA, 2007; MINELLA; MERTEN, 2011).

### ***1.1.1 Condições antecedentes***

As condições antecedentes de precipitação e umidade do solo na bacia apresentam uma importante relação com a produção de sedimentos. A precipitação e a umidade antecedente são fatores que se diferenciam de bacia para bacia, e devido a isso para cada bacia apresentam relações diferentes com a produção de sedimento (Seeger et al., 2004; Soler et al., 2007 e Zabaleta et al., 2007). Para Soler et al. (2007) as condições de umidade antecedente do solo influenciam o escoamento superficial na bacia e, conseqüentemente também, a *Css*. Seeger et al. (2004) identificaram e classificaram relações diferentes entre *Q* e *Css*, um dos três fatores que possibilitaram diferenciá-los foi a precipitação antecedente. Smith et al. (2003) examinaram a influência da deposição de sedimento no leito do rio, anterior ao evento, na produção de sedimento suspenso da bacia. Essa deposição antecedente de sedimento na bacia explicou parte das diferenças na forma e na magnitude do transporte de sedimento da bacia. Zabaleta *et al.*, (2007), analisaram a dinâmica fluviossedimentológica em três bacias, e em duas foram encontradas correlações entre precipitação antecedente e sedimentos em suspensão.

## **2. Dinâmica fluviossedimentológica**

A produção e o transporte de sedimentos desencadeiam alguns fatores como: perda de solo e processos erosivos, com isso pode ocorrer o transporte de contaminantes para o canal fluvial, e causando o assoreamento de reservatórios e de canais, degradação ambiental e impactos recreativos (CARVALHO, 1995; ROVIRA *et al.*, 2006; HOROWITZ, 2008).

O sedimento é um dos elementos mais importantes na bacia hidrográfica, pois pode ser utilizado na avaliação do nível de contaminação dos ecossistemas aquáticos continentais, porque nele podem ser acumulados compostos orgânicos, inseticidas, herbicidas ou inorgânicos como elementos-traço, onde podem alcançar concentrações elevadas (ESTEVES, 1998). Com isso ameaça a vida aquática, animal e a qualidade da vida humana tanto por contaminação quanto por não servir para consumo.

É neste sentido que o presente trabalho visa contribuir ainda mais para a caracterização da bacia do rio Guabiroba em termos de descarga sólida de sedimentos em suspensão, vazão e suas relações com as características físicas da chuva.

A produção e transporte de sedimentos inicia-se com os processos erosivos desencadeados pelas chuvas, no próximo capítulo trataremos principalmente da erosão hídrica uma das principais formas que atua na área de estudo.

## **2.1 Relação dos processos erosivos e a precipitação**

A chuva segundo Lombardi Neto & Pastana (1972), é o principal agente ativo que intervém na erosão do solo. A relação chuva-erosão está na dinamicidade da paisagem, contudo ao longo dos avanços nos estudos sobre essa relação, pode-se afirmar que os processos erosivos atuam de forma degradacional e deposicional na esculturação da paisagem.

A principal causa da degradação das terras agrícolas é a erosão dos solos, a qual consiste nos processos de desprendimento e arraste de suas partículas, causados pela ação da água e do vento. A erosão pode ser classificada em quatro tipos: erosão eólica, erosão hídrica superficial, a de remoção em massa e a erosão fluvial (CARVALHO,1994). Esta erosão é causada pela chuva e pelo escoamento superficial, sendo afetada por um grande número de agentes naturais e antrópicos.

Bertoni e Lombardi Neto (2010), consideram nove formas de erosão hídrica, a inicial pelo impacto da gota da chuva, erosão laminar, erosão em sulcos, voçorocas, deslocamento e escorregamentos de massas de solo, erosão em pedestal, erosão em pináculo, erosão em túnel e erosão da fertilidade do solo.

Segundo Brady e Weil (2013), em certo momento, a história mostrará que um dos avanços científicos mais significativo do século foi a constatação de que a maior parte da erosão se inicia com o impacto das gotas de chuva, e não com o fluxo da água corrente. Pois antes dessa descoberta para conter os processos erosivos as medidas de recuperação e conservação do solo compreendia apenas o fluxo da água, por ser mais visível e não considerava o impacto da gota da chuva.

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2010), para relacionar a erosão com a precipitação em forma de chuva deve considerar a energia do impacto das gotas. Em uma estimativa feita pelos autores, consideram uma chuva intensa com 50 mm em um período de 30 minutos; essa chuva pesaria cerca de 560 toneladas em um hectare. Considerando o tamanho médio das gotas de 3 mm, com velocidade de 8 metros por segundo, nessas condições o solo possui dificuldade na absorção da água da chuva. Com o impacto das gotas da chuva rompem os agregados do solo, desprende e transporta as partículas mais finas, que

são a de maior valor para a agricultura, causando a compactação do solo, prejudicando na capacidade do absorver água e aumentando o escoamento superficial.

O aumento do escoamento superficial influencia no aumento de transporte de partículas de solo, esse fator aliado a falta de controle da remoção de sedimentos das bacias hidrográficas acarreta prejuízos para a produção agrícola, decorrentes dos impactos ambientais gerados pela falta de conservação do solo. Nas regiões tropicais e subtropicais, nas quais a maior agressividade dos regimes pluviométricos faz com que esses fenômenos sejam naturalmente mais intensos que nas regiões temperadas, é de se esperar que o desequilíbrio do ciclo hidrossedimentológico tenha potencialmente consequências ainda mais prejudiciais (TUCCI, 1993).

Carvalho *et al.* (2005), consideram a chuva um dos principais agentes ativos no processo da erosão hídrica, sendo de extrema importância avaliar a resposta do solo às diferentes precipitações, tanto em termos do volume precipitado quanto pela duração e característica do evento. Segundo Hudson (1973 e 1981), citado por Nascimento e Chaves (1996), a chuva é considerada o fator que mais influencia na erosão do solo, particularmente em condições de clima tropical e subtropical, devido as características físicas das chuvas.

## **2.2 Características físicas da chuva**

As características físicas das chuvas que influenciam no processo de erosão do solo, foram estudadas por diversos pesquisadores, dentre eles destaca-se: Duney (1939), Laws (1941), Ellison (1947), Wischmeier (1949 e 1959), Pfafstetter (1957), Wischmeier e Smith (1958 e 1978), Smith (1958), Hudson (1973 e 1981), Foster (1981), (Flanagan *et al.* 1988). Esses são alguns dos pioneiros que consideram as características físicas das chuvas: intensidade, duração, frequência.

A intensidade e a velocidade terminal das gotas são controladas pela distribuição e o tamanho das gotas, sendo que a velocidade terminal da gota aumenta em função da altura de queda e de seu tamanho, atingindo valor máximo a 8 m de altura com gotas de 5 mm de diâmetro. Esse processo determina a energia cinética da chuva e, juntamente com a sua duração, são as características que mais influenciam na remoção das partículas do solo (LAWS, 1941; WISCHMEIER e SMITH, 1958; HUDSON, 1973), citados por (MACHADO, 2011).

Segundo Moruzzi e Oliveira (2009), chuvas com alta intensidade são aquelas que provocam cheias no sistema de drenagem, gerando escoamentos até os canais de drenagem, de modo que as vazões de pico atingem valores próximos à capacidade do sistema,

resultando em inundações. Para Silva *et al.* (2003), a chuva intensa é aquela que apresenta grande lâmina precipitada, durante pequeno intervalo de tempo. Precipitações pluviométricas de maior intensidade e com grande frequência elevam o risco de ocorrência da erosão. Essas características são mais significativas quando associadas às condições de relevo movimentado, características físico-hídricas do solo adversas, uso e manejo do solo inadequados.

A intensidade das chuvas pode ser classificadas de três formas conforme Reichardt (1986). Sendo a primeira como chuva fraca até 2,5 mm/h, constituída de gotas isoladas e facilmente identificáveis. A garoa se enquadra nesse conjunto com características de precipitação uniforme, com gotículas de diâmetro inferior a 0,5 mm e muito numerosas. A segunda forma sendo a chuva moderada: de 2,5 a 7,5 mm/h. Constituída de gotas isoladas e dificilmente observáveis, que formam de maneira relativamente rápida as poças d'água. A terceira é classificada como chuva forte, com intensidade superior a 7,5 mm/h. Esse tipo de chuva parece cair em lençóis, não sendo possível identificar gotas isoladas. Com isso a rápida formação de poças d'água, também desencadeia o escoamento dessa água acumulada (REICHARDT, 1986)

A duração da chuva refere-se ao tempo de chuva, essa característica atua com um complemento da intensidade, a combinação dos dois determina a chuva total, importante para determinar o limite da saturação do solo, no qual a água para de infiltrar e começa a enxurrada.

A frequência de chuvas é outro fator que influencia nas perdas de solo, pois se os intervalos entre elas forem curtos, o conteúdo de umidade do solo ainda pode estar alto, e com isso, os escoamentos serão mais volumosos mesmo a precipitação da chuva não sendo de maior intensidade (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010). Frequência de chuva com intervalos maiores no solo seco condiciona uma boa infiltração inicial, resultando em pouca enxurrada com chuvas de baixa intensidade. Nos períodos de estiagem em lugares com diminuição da proteção vegetal por falta de umidade, conseguintes maiores riscos de erosão nas primeiras chuvas.

A chuva tem o potencial erosivo quantificado a partir de suas características físicas. Sendo a chuva um elemento fundamental no processo erosivo e na dinâmica fluvial, por essa razão é necessário caracteriza-la na área de estudo, pois as características das chuvas mudam de região para região (FLANAGAN et al., 1988).

Os estudos hidrossedimentológicos relatam a importância de pesquisar em períodos variados, porém mais importante no chuvoso, pois a maior parte dos sedimentos

transportados (70 a 90%) acontece na época chuvosa (Carvalho (1994), Rodrigues Júnior et al (1997), Paranhos e Paiva (2003) e Bertoni e Lombardi Neto (2010).

### **2.3 A produção de Sedimento**

Os estudos sobre a produção de sedimento vêm sendo estudados desde o século XIX e XX de forma constante, o que propicia o entendimento geral dos processos e a maneira que são formados e produzidos os sedimentos que se originam na bacia hidrográfica (BORDAS e SEMMELMANN, 2001; TUCCI 1997; CHRISTOFOLETTI, 1999). A formação dos sedimentos é um processo natural, e tem que estar em equilíbrio com os outros processos naturais (solo e ambientes aquáticos), pois se não estiver equilibrado essa produção dos sedimentos em excesso pode acabar chegando as redes de drenagens. Em função disso Walling (1990) e Carvalho (2008), defendem a expressão de fornecimento de sedimentos para referir-se à parcela do material que atinge o exutório da bacia, ao invés de produção de sedimento. Visto que essa está principalmente relacionada aos impactos da erosão nos recursos hídricos (ALMEIDA FILHO, 2008).

A produção de sedimento pode ser entendida como a quantidade de partículas erodidas que são transportadas pelo curso d'água. A produção é resultado dos eventos naturais (intemperismos) e antrópicos (manejo) esses, associados a diversas variáveis podem apresentar maior ou menor produção por área (BROOKS *et al.*1991; CARVALHO, 2008; PEREIRA, 2010).

O sedimento é um meio semi sólido formado por partículas minerais derivada da rocha, água intersticial e uma mistura de componentes físicos, químicos e biológicos, estruturados em escala micro e macro ambientes, podendo estar interligados (BURTON e MACPHERSON, 1995). Esse material pode ser transportado pela água ou pelo vento do lugar de origem com destino aos rios e locais de deposição (CARVALHO, 2008).

A produção de sedimento atua tanto na superfície do terreno quanto no canal de drenagem. Portanto no próximo tópico será contextualizado o comportamento da concentração de sedimento em suspensão, de acordo com o objetivo desse trabalho abordaremos apenas as partículas fluviais.

#### **2.3.1 Concentração de sedimento em suspensão**

Os sedimentos em suspensão, são as partículas transportadas das fontes de sedimento até aos cursos fluviais ou canal de drenagens. Para Gburek *et al.*, (2000), o transporte de sedimentos para a rede de drenagens é complexo em razão da influência de muitos processos, como: a erosão do solo, o transporte de sedimentos e a deposição na bacia.

De acordo com Taylor (2007), a dinâmica sedimentar, processo de transporte e formação de sedimentos, inicia-se quando as partículas de sedimento são depositadas na bacia, e o transporte dessas partículas dá-se de acordo com sua granulometria, sendo as finas removidas e transportadas mais facilmente. Devido à deposição do sedimento as condições ambientais são alteradas quimicamente, pelos componentes que podem ser transportados juntos (poluentes tóxicos); e fisicamente pelo atrito das partículas em sua movimentação. As partículas finas são transportadas por uma distância maior devido à facilidade do seu peso e tamanho, essas são removidas via sistema de drenagem e são inseridas nos corpos d'água ou canal de drenagem tanto pelo escoamento das chuvas, atividades antrópicas ou dessedentação animal.

As partículas de sedimento podem ser transportadas em suspensão e nesse processo sofrem alterações químicas e físicas. Quando depositadas junto ao material de fundo do rio ou ao longo do sistema de drenagem, em áreas antropizadas (colunas de pontes, canos, roldões, bombas ...), também podem ser alteradas de forma química ou física. A limpeza e a remoção das partículas do sistema de drenagem acontece quando as taxas de turbulência e velocidade da água diminuem, geralmente em períodos de estiagem. Onde grande parte das partículas de sedimento em suspensão decantam ou são transportadas a um canal maior, deixando a água com turbidez estável e coloração límpida (Taylor, 2007)

Em cada grama de sedimento são encontradas vivendo bilhões de bactérias, essas metabolizam e fazem o ciclo dos ácidos orgânicos, nitrogênio, enxofre, metano e compostos orgânicos (BURTON e MACPHERSON, 1995). Segundo Ward e Trimble (1995), Vestena, (2009) e Taylor (2007), a concentração de sedimento em suspensão compreende as partículas com granulometria reduzida e por serem pequenas se mantêm em suspensão, essas representam cerca de mais e 90% do material total transportado.

No ciclo Hidrossedimentológico o transporte de sedimentos presentes na superfície da bacia para canal de drenagem, está intimamente ligado ao ciclo hidrológico. Os canais de drenagem são abastecidos pelo lento escoamento do lençol freático, sendo estes abastecidos por águas pluviais (chuvas) infiltradas no solo ou na rocha, ou diretamente pelo escoamento superficial das águas da chuva (Tucci, 1993). Segundo Vestena (2009), o transporte de

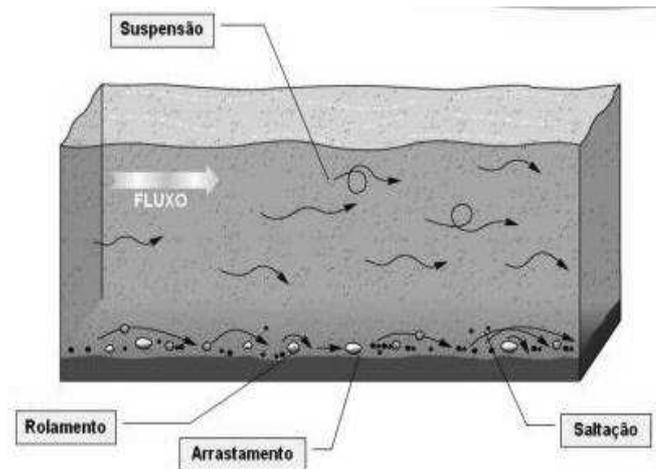
sedimento pelos canais de drenagem é um fenômeno complexo e um dos desafios tem sido entender a dinâmica dos processos (...) em pequenas e médias bacias hidrográficas.

O transporte de sedimento em suspensão pode ser avaliado sob duas perspectivas, o transporte de sedimentos na superfície terrestre e o transporte de sedimento em suspensão no canal fluvial. As formas de transporte sólido e transporte em suspensão são discutidas separadamente segundo Carvalho (2008), porque o fenômeno não está suficientemente entendido para permitir a explicação completa e inter-relacionada.

O material erodido oriundo de diversas fontes de sedimento são transportados pelo escoamento superficial ou atividades antrópicas até a deposição no o canal de drenagem. Segundo Vestena (2009), a concentração de sedimento em suspensão são partículas de granulometria reduzida sendo principalmente as partículas consideradas finas como silte e argila, devido a isso as partículas se mantem na maior parte do tempo de fluxo em suspensão.

Conforme Carvalho (1994), o transporte das partículas de sedimento em suspensão no canal de drenagem podem representar uma média de 70 a 90% do total anual, em períodos de intensa precipitação, segundo Ward e Trimble (1995), citado por Vestena (2009). Para Merten *et al.* (2008), o transporte de sedimentos em rios pode ocorrer em diferentes modalidades dependendo das condições hidrodinâmicas do escoamento e das propriedades dos sedimentos.

Carvalho (1994), destaca que as formas de transporte de sedimento no canal de drenagem são três: (1º) carga sólida de arrasto, (2º) carga sólida saltante, (3º) carga sólida em suspensão. A 1º forma, são as partículas de sedimento que se movimentam em sentido longitudinal e mantém-se em contato ou próximas ao leito na maioria do tempo. A 2º forma, são as partículas que saltam ao longo do canal de drenagem por efeito da correnteza ou devido ao impacto com as demais partículas. Esse contato das partículas em movimentos geram uma pressão negativa. Na 3º forma, as partículas de sedimento estão suportadas pelos componentes verticais de velocidades do fluxo turbulento, enquanto são transportadas pelas componentes horizontais dessas velocidades. Pela granulometria reduzida as partículas de sedimento mais finos concentram próximas a superfície da lamina d'água, com movimentos circulares subindo e descendo na corrente acima do leito. Carvalho (1994, p. 74), enfatiza que “o movimento da partícula em suspensão é mais complexo do que a do leito” (Figura 1).



**Figura 1** – Ilustração da dinâmica de transporte de sedimento. Fonte: CARVALHO (2003).

A dinâmica fluviossedimentológica se torna mais eficiente no que se refere ao transporte de sedimentos e carga dissolvida à medida que aumenta a vazão. A vazão por sua capacidade de transporte, pode sofrer intervenções por diferentes fatores, como por exemplo: variação climática sazonal, variação no suprimento de sedimento, mudanças morfológicas nas seções dos rios, variação nos processos que controlam a capacidade de erodir e transportar (Morehead *et al.* 2003).

### 3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Guabiroba – BHRG é um afluente da margem esquerda do rio das Pedras, segundo Thomaz (2005), a bacia está posicionada no sentido de Leste para Oeste e com hierarquia fluvial de 4º ordem, extensão próxima a 9,2km. Thomaz (2005, p.45), a densidade da drenagem é de 3,18, o gradiente hídrico em cerca de 2,8% com desnível de 260m. Essas características hidrográficas fazem parte de um conjunto cuja vegetação na região é formada por mata de araucárias e pinheiros de acordo com a classificação dos domínios morfoclimáticos da América do sul de Ab'Saber (1997). A BHRG possui aproximados 23 km<sup>2</sup> de área, situa-se a Leste da área urbana da cidade de Guarapuava, está localizado entre as coordenadas geográficas: Norte 25 °23' latitude S, ao Sul, 25 °25' latitude S. A Leste, 51 °20' longitude W e ao Oeste 51 °25' W de Greenwich. A área de estudo foi definida a partir da estação fluviossedimentológica automática e pluviógrafo instalado, que localizam-se na interseção da latitude 27° 42' 18" S e da longitude 49° 20' 00" W (Figura - 2).

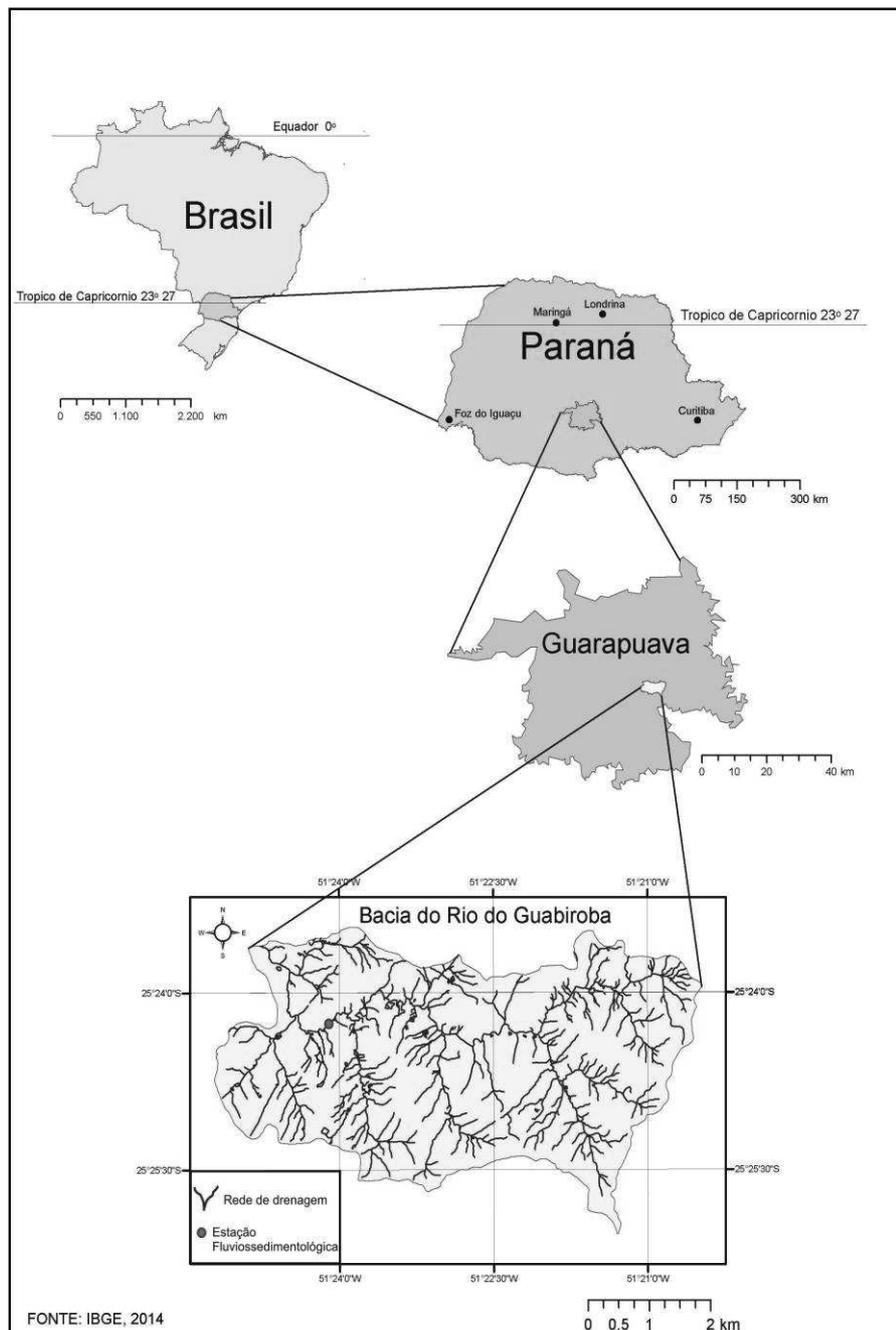
#### 3.1 Clima

O clima de Guarapuava pode ser classificado como Clima Subtropical Úmido Mesotérmico (Cfb, na Classificação climática de Köppen-Geiger), apresentando verões frescos (temperatura média inferior a 21°C), invernos frios com ocorrências de geadas severas e frequentes. As chuvas bem distribuídas ao longo do ano, sem ocorrência de longas estações secas, pluviosidade variando de 1.200 a 1.800mm, segundo o estudo de Thomaz e Vestena (2003), na área as chuvas médias ficam em torno de 1961mm. Em relação à umidade relativa do ar (UR), segundo Thomaz e Vestena (2003), pode ser entendida como a quantidade vapor d'água existente no ar, em condição que não ocorra condensação, médias anuais maiores de UR para a Guarapuava foram de maior 82% e 74% no ano de 1983 e 2003, respectivamente.

As precipitações ao longo do ano apresentam médias mensais acima de 100 mm; com variações extremas consideráveis, destaca-se o ano de 1985 (mínima) e 1983 (máxima), com 1262mm e 3168mm, respectivamente. A temperatura média anual varia de 16 a 17,5°C, com média anual de 17°C; os meses mais frios são junho e julho, enquanto janeiro e fevereiro são os mais quentes (THOMAZ e VESTENA, 2003, p.29). No trabalho de Luiz (2007) na BHRG, nas altitudes acima de 970 m, considera-se que a área pertença a formação da

superfície de dissecação, apresentando clima frio, sujeito a geadas, com média igual ou inferior a 15° C, e o período quente com média de 20° C.

Os tipos de chuvas predominantes são ciclônicas ou frontais, ocasionadas pela ação da massa polar de atlântica (Thomaz e Vestena, 2003). Segundo Cunha *et al.*(2010), em seu trabalho na região, destacaram a importância das chuvas para o clima, este está condicionado a uma variedade de fatores como a altitude, a continentalidade, a vegetação, a latitude, as massas de ar atuantes entre outros que forma uma dinâmica complexa.



**Figura 02.** Bacia hidrográfica do rio Guabiroba e localização da estação fluviossedimentológica.

### 3.2 Litologia, relevo e solo

A área de estudo: bacia hidrográfica do Rio Guabiroba (BHRG), localiza-se em Guarapuava, no Terceiro Planalto paranaense, ou planalto de Guarapuava. As características geomorfológicas da região de Guarapuava e da área de estudo do rio Guabiroba, constitui o relevo que apresenta morfologia com forte ondulação até montanhoso, segundo Thomaz (2000), o relevo é bastante dissecado, contendo vertentes côncavas, convexas e retilíneas.

Para Ribeiro (1989), a geomorfologia de Guarapuava apresentou três classificações de dissecção para a região: suave; média; e forte. Dissecção suave: apresentam predomínio de divisores com topos tabulares e largos. Dissecção média: nessa estrutura, nota-se a presença predominante de vales em V normais. Dissecção forte: associam-se às áreas mais fraturadas da calha do rio Iguaçu e seus afluentes da margem direita. O aprofundamento da drenagem é vigoroso, com desníveis de até 300 m. Essas características na morfologia apresentam áreas com restrições (solos rasos de encostas declivosas, impróprios para a agricultura), e os solos mais profundos ficam na baixa vertente, nos fundos de vale onde é possível utilizar máquinas para o cultivo agrícola.

Os principais tipos de solos são formados a partir do substrato rochoso basáltico de origem ígnea efusiva. Na BHRG os tipos de solos são de textura argilosa, em vertentes com maior declividade apresenta afloramento rochoso e solo com granulometria pedregosa, sendo os Litólicos Álicos (Neossolos Litólicos) e Cambissolos Álico é constituído por minerais, não são hidromórficos, com horizonte B incipiente, acentuada a imperfeitamente drenados, não plínticos e de textura franco arenosa ou mais fina; sua profundidade varia de raso a profundo, apresenta sequência de horizonte A, Bi e C (EMBRAPA, 2006). Esses solos não representam um alto potencial agrícola para região, e os solos com maior profundidade podem ter seu potencial prejudicado pelo manejo inadequado, que resulta nos processos erosivos.

### **3.2 Vegetação**

A vegetação na região possui espécies que se desenvolveram a partir das variações climáticas é caracterizada por uma condição arbórea, denominada floresta ombrófila mista, com árvores de mais de 30 m de altura, sendo a *Araucária angustifolia*, uma gimnosperma aciculifoliada a espécie mais representativa, porém devido às atividades madeireiras está vegetação, assim como outras de valor comercial, foram muito exploradas, ficando escassas.

Segundo Bigarella *et al.*, (1994), Leite (1995) e Ab'Saber (2003), a floresta ombrófila mista apresenta particularidades devido a condição climática, geomorfopedológica

A Araucária angustifolia aparece geralmente associada com outras árvores segundo Luiz (2007), são do gênero *Podocarpus*, *Drymis*, *Ocotea*, *Nectandra* e *Tabebuia*, composição florística.

A região de Guarapuava além das matas de Araucárias, também é conhecida pelos campos abertos. Esses podem ser classificados em três categorias segundo Ribeiro (1989), como: campos, capões (estepe ombrófila) e campos úmidos. Os campos na primeira categoria são constituídos de gramíneas, ciperáceas entre outras plantas de pequenas estaturas rasteira, essas são encontradas nos topos e nas vertentes com solos bem drenados. Sendo a segunda categoria os capões ou estepe ombrófilo, que se desenvolve em solos moderadamente drenados onde o escoamento superficial difuso se concentra. Os campos úmidos são geralmente encontrados nos fundos de vale com formas achatadas e parcialmente colmatados permitindo a lenta drenagem do solo. Nessas condições a presença de matéria orgânica e solo argiloso é abundante desenvolvendo a adaptação favorável das ervas e arbustos (RIBEIRO, 1989).

No próximo capítulo dispõe dos procedimentos metodológicos para avaliar as características físicas da área de estudo por meio da análise do efeito histerese.

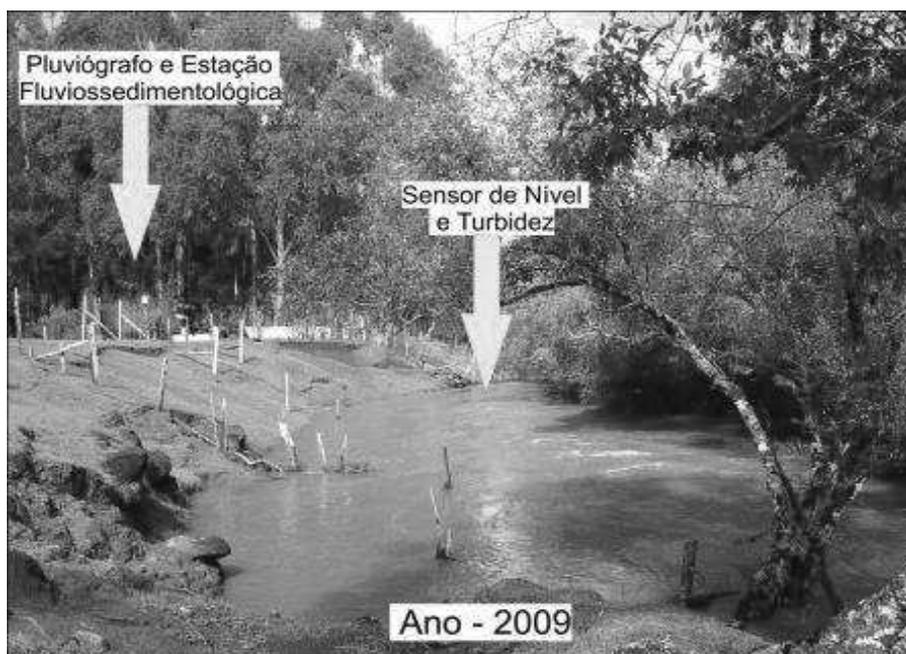
#### 4. MATERIAIS e MÉTODOS

Para monitoramento da dinâmica fluviossedimentológica na bacia hidrográfica do rio Guabiroba foi utilizada uma estação fluviossedimentológica, pluviógrafo e leituras dos níveis de cota, figura – 3 e 4. No geral os eventos (Css, Q e P), foram selecionados considerando os meses mais chuvosos, janeiro e outubro e, os menos chuvosos agosto e julho (THOMAZ e VESTENA, 2003; CUNHA *et al.* (2010). Posteriormente foram elaborados com o banco de dados referentes a cada evento os gráficos: hidrogramas (Q), sedimentogramas (Css), e hietogramas (P).

Na sequência foram realizados trabalhos de campo para verificação do mapeamento das cartas de uso da terra, rede de drenagens e estradas, e avaliação do comportamento hidrológico em dias chuvosos. Na última etapa, os 20 eventos selecionados foram avaliados por meio de análise qualitativa utilizando o método de classificação do efeito histerese de Williams (1989), e análise quantitativa com aplicação dos parâmetros de coeficiente de determinação estatística ( $r^2$ ), índice de histerese - mg/L (IH), vazão do ramo ascendente -  $m^3/s$  ( $Q_{cen}$ ), tempo de duração da precipitação - hora (TDP) e intensidade média da chuva durante o evento (IM).



**Figura 3** – Carta de rede de drenagem e estradas rurais da bacia hidrográfica do rio Guabiroba. Elaboração: Bortolatto, F e Castro, R.A. (2014).



**Figura 4.** Pluviógrafo e Estação fluviossedimentológica do Rio Guabiroba  
**Foto:** Leandro R. Vestena (2009)

Com os dados pluviométricos e fluviossedimentológicos, para estabelecer a relação CSS e Q foram escolhidos 20 eventos ocorridos no período de janeiro de 2009 a janeiro de 2011. Então foi estabelecido um parâmetro para definir um evento neste trabalho, o primeiro parâmetro foi definir que um evento é um evento de chuva, cuja quantidade proporcionou alterações nas vazões e CSS e intervalos de tempo entre o evento de chuva e a resposta no fluxo de água no canal que atendem as condições do tempo de concentração da bacia, conforme Vestena (2009) p.416. Foi observado que para o evento de chuva causar resposta significativa no fluxo do canal a precipitação mínima é de 9 mm, o segundo parâmetro foi selecionar eventos com características diversas de  $P_{ant}$ - a precipitação no dia anterior ao evento (mm) ou sem  $P_{ant}$ , e com variabilidade do TDE - o tempo de duração do evento, pois o TDE é a soma do tempo de duração do evento (h), contando desde o primeiro dado de C<sub>ss</sub> no início do ramo crescente até último dado do ramo decrescente da curva de C<sub>ss</sub>.

#### 4.1 Medidas da Dinâmica Fluviossedimentológica

As medidas da dinâmica fluviossedimentológica na bacia rural do rio Guabiroba, considerou a relação entre a vazão – (Q) e a Concentração de sedimento em suspensão – (C<sub>ss</sub>), nos quais apresenta padrões temporais complexos durante os eventos de chuva governados pela geomorfologia, uso e manejo do solo. Este fato tem implicações relevantes no entendimento e na descrição dos processos erosivos e de produção de sedimentos na bacia, esses padrões são avaliados pelas características da *histerese* entre a C<sub>ss</sub> e a Q.

Para a realização deste trabalho utilizou-se o banco de dados fluviossedimentológico e pluviométrico obtido pelo monitoramento do grupo de pesquisa de hidrogeomorfologia – UNICENTRO.

#### ***4.1.1 Medidas pluviométricas***

Os dados pluviométricos foram coletados no período de 2008 até 2011, tendo algumas obstruções na continuidade desses dados por problemas técnicos nos equipamentos, foram selecionados os dados de precipitação de 2009 a 2010. Os parâmetros seguidos para a seleção dos eventos foram obtidos por meio da escolha de chuvas com mínimo a partir de 9 mm, pois a equipe do Lab hidro (UNICENTRO), uma vez em observações em campo verificou-se que eventos de chuva com volumes acima de 9 ou 8 mm geram alterações significativas na quantidade de sedimento em suspensão transportado no canal de drenagem, e o aspecto da água no canal fica com coloração escura. Foram analisados apenas um pluviógrafo e um pluviômetro, na foz do rio Guabiroba, devido à falta de mais equipamentos pluviométricos ao longo da bacia hidrográfica, as análises são focadas para a proximidade da estação fluviossedimentológica. A intensidade média (IM), foi obtida a partir do volume total precipitado por evento, pelo tempo de duração da precipitação (TDP) calculado em mm/horas, considerando apenas o período de tempo onde ocorreu chuva, dentro do tempo de duração total do evento (TDE). As chuvas foram classificadas conforme suas intensidades médias, conforme Reichardt (1986). Considerando Chuva fraca: até 2,5 mm/h. Chuva moderada: de 2,5 a 7,5 mm/h. Chuva forte: intensidade superior a 7,5 mm/h (REICHARDT, 1986).

#### ***4.1.2 Medidas da concentração de sedimento suspenso (Css)***

As medidas da carga sólida em suspensão (Css), foram obtidas pela estação fluviossedimentológica automática, instalada nas proximidades da foz do rio Guabiroba. Nesse local o aporte de sedimento é mais concentrado devido o transporte de materiais na rede de drenagem da montante até a foz. Para o monitoramento da Css, foi utilizado o sensor de sedimento e turbidez modelo SL 2000-TS, que funciona a partir da medição da refletância da turbidez pela luz infravermelha imune à cor da água, na faixa de medição de turbidez de 0 ~ 2500 NTU. A estação fluviossedimentológica faz a leitura em NTU e automaticamente transforma esse valor em dado de Css (mg/L, então os dados já são armazenados com o sistema data logger, e a leitura desses já são de Css. A Css foi monitorada em, intervalos temporal de 15 minutos, para que fosse possível avaliar as alterações na Css o sensor foi

calibrado com material do rio Guabiraba e instalado em 2008, pelo grupo de pesquisa de hidrogeomorfologia – UNICENTRO. Na calibração foi utilizado verificações em laboratório com turbidímetros de mesa para calibrar os dados obtidos em campo pelo sensor de turbidez.

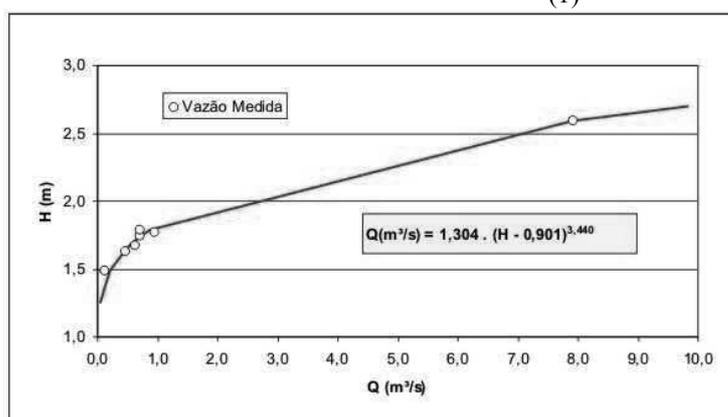
#### 4.1.3 Medidas de Vazão ( $Q$ )

As medidas de vazão ( $Q$ ), foram obtidas segundo Thomaz e Vestena (2010), por meio dos procedimentos descrito em SANTOS et. al. (2001), constatando o volume de água que passa através de uma seção transversal em uma unidade de tempo. A técnica de medição e integração da distribuição de velocidade utilizando o molinete hidrométrico, modelo *FP 101-FP 201 Global Flow Probe*, produzido pela *Global Water*. A utilização do molinete hidrométrico deu-se para medição da velocidade do escoamento em um número significativo de pontos ao longo de uma seção transversal do rio Guabiroba, próximo à estação fluviossedimentológica.

A partir das medidas de descarga líquidas a curva-chave foi determinada conforme a equação 1 abaixo e representada pela figura 5, sendo  $H$  o nível de água na régua fluviométrica em metros (THOMAZ e VESTENA, 2010).

As vazões fluviais em intervalos temporais de 15 minutos foram obtidas utilizando-se da Eq. 1, e de dados de altura de água (cota) monitoradas por meio de um sensor automático de pressão da coluna de água, instalado na estação fluviossedimentológica.

$$Q_{(m^3/s)} = 1,304(H - 0,901)^{3,44} \quad (1)$$



**Figura 5.** Curva-chave da estação fluviométrica do rio Guabiroba

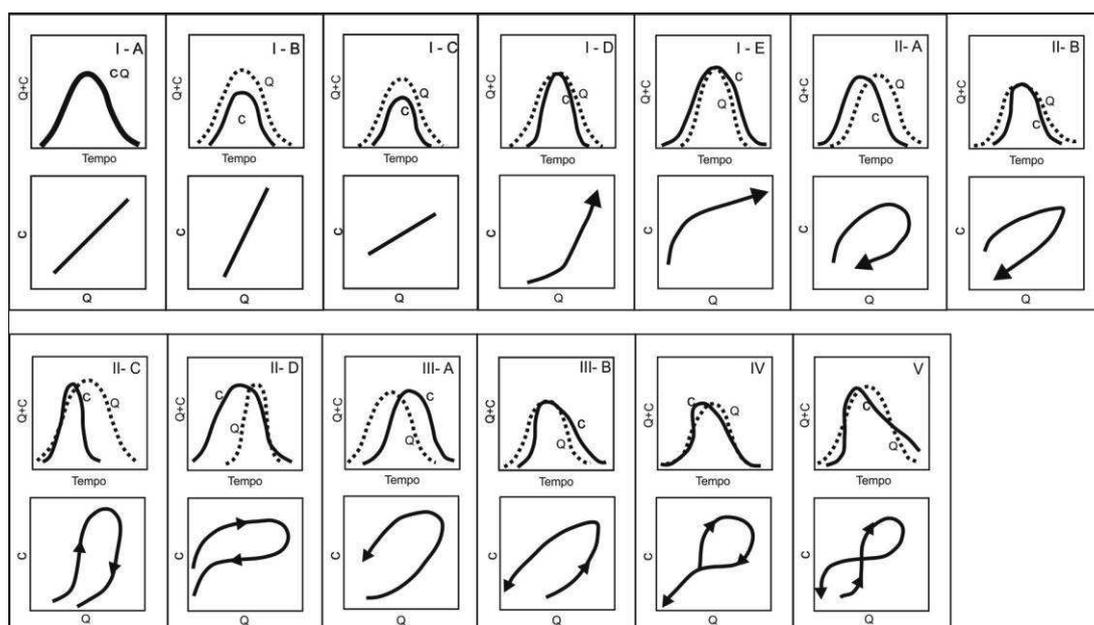
**Fonte:** Thomas e Vestena (2010)

#### 4.1.4 Análise qualitativa da histerese

Com base nos dados do monitoramento hidrossedimentológico, o processo de geração e transferência de sedimentos das vertentes para o canal fluvial ocorre,

fundamentalmente, durante os eventos de precipitação. Seguindo esse critério os 20 eventos foram selecionados. Para representar o comportamento da  $C_{ss}$  e da  $Q$  no tempo do evento, e em intervalos de quinze minutos na leitura dos dados pela estação fluviossedimentológica, e assim demonstrar a relação entre essas variáveis, foi utilizada a *histerese* para caracterizar o comportamento hidrossedimentológico na bacia rural.

As análises das *histereses* foram caracterizadas qualitativamente, conforme a metodologia citada por Williams (1989), que buscou explicar as relações entre concentração de sedimento suspenso e vazão, a qual propicia a compreensão de como variam o regime fluviossedimentológico. A classificação da histerese foi definida por meio dos cinco modelos de acordo com Williams (1989), os modelos são: (I) *single-valued line* (única linha, reta ou curva); (II) *clockwise loop* (curva no sentido horário); (III) *counterclockwise loop* (curva no sentido anti-horário); (IV) *single line plus loop* (linha única acrescida de uma volta); e (V) *figure eight* (figura oito) (Figura 6).



**Nota:** Williams(1989). (1)  $C$  é a concentração de sedimentos, e  $Q$  é a vazão ou descarga fluvial. (2) **Classe I** - única linha (reta ou curva) (*single-valued line*): (Ia) linha reta de  $45^\circ$ ; (Ib) linha reta com inclinação  $> 1$ ; (Ic) linha reta com inclinação  $< 1$ ; (Id) ângulo voltando-se para cima; (Ie) ângulo voltando-se para baixo. **Classe II** - curva no sentido horário (*clockwise loop*): (IIa) concentração chegando ao pico antes da vazão; (IIb) picos simultâneos de água e sedimento; (IIc) curvas assimétricas - expansão da concentração menor que a vazão, com a concentração chegando ao pico primeiro; (IId) curvas assimétricas - expansão da concentração e maior que a vazão, com a concentração chegando ao pico primeiro. **Classe III** - curva no sentido anti-horário (*counterclockwise loop*): (IIIa) vazão chegando ao pico antes da concentração de sedimento; (IIIb) picos de vazão e concentração são simultâneos. **Classe IV** - linha única acrescida de uma volta (*single line plus loop*). **Classe V** - figura oito (*figure eight*) VESTENA (2008).

**Fonte:** Elaborado a partir de WILLIAMS (1989), encontrado em VESTENA (2008).

**Figura 6.** Esquema dos modelos de relação entre concentração de sedimento e vazão representados pela curva de *Histerese*.

Segundo Lefrancois *et al.* (2007), a *histerese* é o aparecimento de um atraso na evolução de um fenômeno físico em relação a outro. O gráfico da variação da  $C_{ss}$  versus

vazão – Q, representa a ocorrência do efeito *histerese*. De maneira geral, a dinâmica da Q e da Css durante os eventos geralmente não apresenta um sincronismo de fase.

#### 4.1.5 Análise quantitativa da histerese

Além da análise qualitativa com a caracterização da *histerese* sobre a relação Css e Q, utilizando o *software* Excel versão 2010, foi possível com a análise quantitativa determinar os parâmetros de uma regressão linear. Sendo a regressão linear determinada por uma reta ( $Y = b + aX$ ), para isso foi calculado: o coeficiente linear da reta (b), o coeficiente angular da reta (a) e o coeficiente de determinação ( $r^2$ ). Sendo assim, possível explicar a demonstração da equação com valor zero a 1 de  $r^2$ , esse valor é obtido diretamente do gráfico de dispersão, pela linha de tendência em uma reta (Linear). O valor do  $R^2$ , é determinado pela variação em porcentagem da Css versus Q. Esse foi o primeiro passo para verificação da relação (Css e Q), nos eventos selecionados.

Segundo Minella *et al.* (2011), com a análise quantitativa é possível quantificar o comportamento da histerese, que permite a comparação entre eventos ou entre bacias. E para essa análise foi utilizada a metodologia de Lawler *et al.* (2006), que quantifica o formato da curva de histerese a partir do índice de histerese – IH. Para obter-se o IH foi realizado a análise dos dados de Q e Css e a elaboração do gráfico dessas variáveis, Q versus Css. Depois, o próximo passo consistiu em identificar a vazão máxima ( $Q_{max}$ ) e a vazão inicial mínima - ( $Q_{min}$ ) do evento, para o calcular o valor central ou médio entre a ( $Q_{max}$ ) e a ( $Q_{min}$ ) do ramo ascendente ( $Q_{cen}$ ) do evento (Eq. 2)

$$Q_{cen} = (Q_{max} + Q_{min}) / 2 \quad (2)$$

Para cada evento foram calculados o valor central da vazão ( $Q_{cen}$ ), a partir desse valor localizado no banco de dados do evento, foi considerado a Css correspondente ao  $Q_{cen}$ , na ascensão e recessão do evento. Para esse procedimento utilizou-se o gráfico de Css versus vazão, para identificar no gráfico o ramo crescente (RC) e o valor de Css RC que corresponde a  $Q_{cen}$ , e o mesmo para os dados do ramo decrescente (RD) que equivalem ao  $Q_{cen}$ . Encontrados os valores de Css RC e Css RD proporcional ao  $Q_{cen}$ , verificasse o sentido da curva de histerese, sendo sentido horário o índice de histerese (IH) será positivo e calculado pela Eq. 3.

$$IH = (Css RC / Css RD) - 1 \quad (3)$$

A curva de histerese possuindo sentido anti-horário, o índice de histerese (IH), será negativo e calculado conforme a Eq. 4.

$$IH = (- C_{ss} RD / C_{ss} RC) + 1 \quad (4)$$

O índice de histerese (IH), possui propensão em diminuir, quando analisado em uma sequência de eventos chuvosos, pois o solo encontrasse saturado e incorpora novas fontes de sedimentos na bacia, conforme os estudos de Lawler et al. (2006) e subsequente aplicado e verificado por Minella et al. (2011).

#### **4.2 Análise da relação concentração de sedimento suspenso, precipitação e vazão**

Para a análise da influência das características da chuva, na relação  $C_{ss}$  versus vazão, nos 20 eventos selecionados, foi utilizado o sedimentograma, hietograma, hidrograma e as classes de histerese. Sendo elas: classe I da Histerese *single – valued line*, classe II com a histerese *clockwise loop*, classe III com a histerese *counterclock wise loop*, classe IV da histerese *single line plus loop* e classe V *figure eight*, conforme seus respectivos eventos.

#### **4.3 Mapeamento da área de estudo**

A elaboração das cartas de rede de drenagem e uso da terra, são importantes para o entendimento da dinâmica e fluviossedimentológica na BHRG. Para desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o software ArcGis versão 10.2, a escolha deste software se deu pelo Laboratório de Hidrologia integrado ao grupo de pesquisa de hidrogeomorfologia pelo mesmo atender as expectativas do trabalho. Para a elaboração da carta de uso da terra foi utilizada a imagem de satélite (2010) da Microsoft ferramenta Data Bing, acoplada a interface do programa software ArcGis, sendo essa vetorizada em classes do tipo de uso da terra, em polígonos pixel a pixel conforme a imagem Bing. A seleção de cada classe de uso da terra seguiu o padrão do manual técnico do uso da terra do IBGE (2006).

### **5. RESULTADO e DISCUSSÃO**

#### **5.1 Mapeamento do uso da terra**

A avaliação do efeito histerese resultado da relação concentração de sedimento suspenso e vazão não podem ser analisados isoladamente, deve ser considerado também o

uso da terra da área de estudo no caso a bacia hidrográfica do rio Guabiroba. O uso da terra nesse trabalho foi importante para identificar áreas que disponibilizam material para o canal.

Os lagos, os solos hidromórficos e as áreas edificadas (Fig. 7), em grande parte se encontram-se na baixa vertente e fundos de vales, juntos representam 3,24% da área total da BHRG. As pastagens ocupam diferentes declividades, recobre a segunda maior porção da bacia 31,7%. Por ser uma área de difícil mecanização a criação de animais se mostra uma prática eficiente, com retorno financeiro e não demanda muitos recursos no manejo do solo (Tab.1). A agricultura mecanizada (Fig. 7), conta com 6,07% de área, e mesmo sendo uma porção pequena, essa atividade revolve do solo e disponibiliza uma quantidade de sedimento significativo para transporte, o que se torna uma questão de atenção. Pois segundo Thomaz (2007), a agricultura mecanizada ocupa uma área significativa do terraço fluvial, e acabam por influenciar a redução da mata ciliar e facilitando o transporte de agroquímicos direto para o sistema fluvial. Segundo Cunha (2010), Peretto (2014), as estradas, carregadores e caminhos também são fontes de sedimento, pois a rede de tráfego está em sobreposição à rede de drenagem da bacia (Tab.1).

As matas apresentam a maior representatividade com área de 39,9%, as formações arbóreas são resquícios da Floresta Ombrófila Mista, composta por matas primárias e matas secundárias que se encontram na alta vertente e topos. A capoeira e a agricultura tradicional, juntas representam 19,09% do total da área da bacia, essas duas são analisadas acopladas, pois segundo Luiz (2007), conforme a necessidade e os recursos do agricultor a área de plantio estende-se para área de capoeira (Fig. 7), (Tab.1).

**Tabela 01.** Área da bacia hidrog. do rio Guabiroba em cada classe de uso da terra em (ha) e (%) para 2010

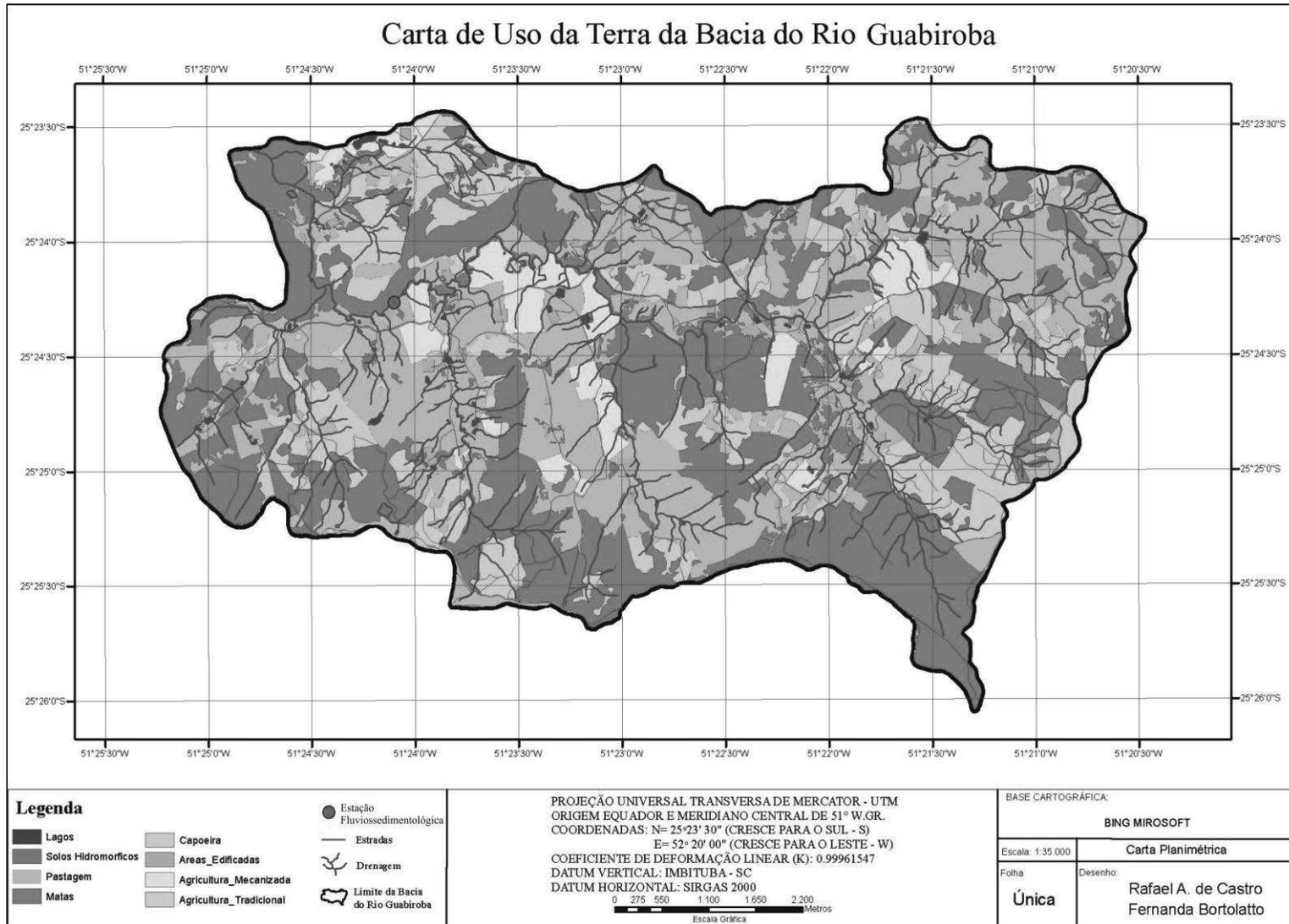
<b>Classes de uso da terra</b>	<b>Área- classes (ha)</b>	<b>(%)</b>
Lagos e áreas úmidas	34,1	2,05
Pastagem	767,2	31,7
Matas	947,3	39,9
Capoeira	256,5	11,8
Áreas edificadas	27,3	1,13
Agricultura mecanizada	151,2	6,07
Agricultura tradicional	179,9	7,29
<b>Total</b>	<b>2363,5</b>	<b>100</b>

Org: Bortolatto.F (2014)

Na bacia do rio Guabiroba o sistema agrícola mais utilizado e o tradicional, nesse sistema começa-se a preparar a terra em junho, em setembro/final do inverno iniciam a queimada da capoeira; e posteriormente realizam o plantio na cinza; as culturas mais comuns na bacia, são a do milho e do feijão. Nos meses de novembro/dezembro são realizados os tratos culturais (capina e herbicida), em janeiro inicia-se a colheita do feijão e em março a

colheita do milho, após a colheita o solo inicia um período de regeneração nos meses de junho a agosto, para um novo ciclo agrícola (THOMAZ, 2007, p.115-116).

As fontes de sedimento mais caracterizadas na BHRG, foram as estradas rurais, e os carreadores que são utilizados principalmente para a retirada de madeira (Thomaz *et al.*, 2011). As estradas, carreadores e caminhos cruzam ou terminam às margens dos rios aumentando a entrada de sedimento no canal fluvial, pois não possuem caixas para a contenção das águas e de sedimento, fazendo com que o escoamento concentrado das águas pluviais, seja canalizado (Thomaz, 2000, p.151-152).



**Figura 7.** Carta de uso da terra da bacia hidrográfica rio Guabiroba.  
 Elaboração: Rafael. A. Castro. Organização: Fernanda Bortolatto, 2014.

## 5.2 Dinâmica fluviossedimentológica

A partir dos eventos selecionados na Tabela 5, são apresentados alguns parâmetros que caracterizam as condições hidrológicas e sedimentológicas dos eventos monitorados. Com propósito de representar a dinâmica fluviossedimentológica com base nos dados foram elaborados quatro tipos de gráfico sendo: (1) Hidrograma (Vazão - Q), (2) Sedimentograma (Concentração de sedimento suspenso- C<sub>ss</sub>), (3) Hietograma (Precipitação - P), (4) gráfico da curva ou do efeito histerese gerado pela relação Q x C<sub>ss</sub>.

Nos 20 eventos selecionados, a pluviosidade máxima total desses eventos foi de 62mm, com média observada de 26,18mm, e entre os eventos o número 12 destacou-se com máxima horária observada de 24,4mm/h. A Concentração de sedimento – C<sub>ss</sub>, obteve máxima total observada dos eventos somando 886mg/L, sendo que a C<sub>ss</sub> mínima observada foi de 23,9 mg/L, e média 154 mg/L. Em relação a vazão, a máxima dos eventos foi de 4,34m<sup>3</sup>/s e mínima 1,61m<sup>3</sup>/s (tab.2).

**Tabela 02.** Resumo dos eventos selecionados, Precipitação (P), Vazão (Q), Concentração de sedimento em suspensão (C<sub>ss</sub>), na bacia hidrográfica do Rio Guabiroba.

Evento	Data/Hora de início	Data/Hora de término	TDE	P(mm) Total 15min	P(mm) Máx. hor. 15min	Q(m <sup>3</sup> /s) Máx. hor. Observ.	C <sub>ss</sub> (mg/L) Máx. hor. Observ.
1	17/01/09 – 07:00	18/01/09 – 13:00	30h	16,6	6,6	1,84	107,6
2	27/02/09 – 06:15	28/02/09 – 07:15	24h	22,4	4,8	1,77	63,9
3	13/05/09 – 03:45	16/05/09 – 10:15	79h	41,8	2,6	1,91	84,4
4	12/10/09 – 00:00	12/10/09 – 22:45	10h	42,6	7,6	3,79	119,8
5	14/10/09 – 17:30	15/10/09 – 08:15	16h	40,4	6,0	2,69	92,8
6	15/10/09 – 21:15	16/10/09 – 21:45	24h	18,9	2,1	2,36	58,6
7	18/10/09 – 16:30	19/10/09 – 06:45	14h	15,1	3,2	2,63	122,8
8	19/10/09 – 05:45	19/10/09 – 22:30	16h	10,2	2,0	2,27	49,3
9	20/10/09 – 10:15	21/10/09 – 23:45	37h	49,6	21,4	2,58	321,9
10	11/12/09 – 23:45	12/12/09 – 23:45	24h	69,0	8,8	7,10	234,8
11	16/12/09 – 15:45	17/12/09 – 11:00	19h	20,2	6,2	1,79	67,09
12	17/12/09 – 08:45	18/12/09 – 10:15	25h	43,4	24,4	41,64	886,0
13	24/12/09 – 11:45	25/12/09 – 10:15	23h	26,6	8,8	2,59	141,4
14	03/01/10 – 13:45	04/01/10 – 12:15	23h	9,9	3,2	1,47	38,6
15	10/01/10 – 10:30	11/01/10 – 11:15	25h	27,2	5,4	1,17	28,78
16	11/01/10 – 12:15	12/01/10 – 14:30	26h	21,4	6,4	2,25	130,5
17	13/01/10 – 02:15	13/01/10 – 13:30	12h	23,6	4,6	1,13	172,0
18	13/01/10 – 14:30	14/01/10 – 01:45	11h	13,8	3,2	4,77	79,5
19	20/01/10 – 03:15	21/01/10 – 09:15	30h	35,8	7,0	3,53	173,3
20	22/01/10 – 02:45	23/01/10 – 06:15	27h	9,6	2,8	0,93	23,9
		<b>Mínima</b>		<b>9,6</b>	<b>2,0</b>	<b>0,93</b>	<b>23,9</b>
		<b>Máxima</b>		<b>69,0</b>	<b>24,4</b>	<b>41,64</b>	<b>886,0</b>
		<b>Média</b>		<b>26,18</b>	<b>6,91</b>	<b>4,28</b>	<b>154,0</b>

\*Nota: TDE – tempo de duração do evento em horas, foi considerado apenas horas fechadas.

O coeficiente de determinação ( $r^2$ ), foi aplicado nesse trabalho para avaliar o grau de predominância das variáveis C<sub>ss</sub> e Q e sua relação, tanto durante a ocorrência total do evento, quanto na ascensão e recessão do hidrograma. A C<sub>ss</sub> e Q conforme a equação para

$r^2$  total do evento, determinou que o evento 6, possui a relação mais significativa 0,99, na relação entre a C<sub>ss</sub> e Q, seguidos dos eventos 14, 18 e 7 que também apresentaram valor médio próximo a 0,83. O  $r^2$  evento do 12, não apresentou alguma relação, esse resultado é importante para demonstrar que na dinâmica fluviossedimentológica pode ocorrer variações e presença de alguns fatores que fazem com que a C<sub>ss</sub> e a Q não esteja relacionadas durante o evento. O evento 1 e 2 possui a correlações menos significativa, em torno de 0,22, os demais 13 eventos apresentaram coeficiente de determinação média de 0,58 e a média total dos 20 eventos de 0,61 (tab. 3).

**Tabela 03.** Coeficiente de determinação da C<sub>ss</sub> (mg/L) versus a vazão (m<sup>3</sup>/s), na ascensão e recessão do hidrograma, para os eventos monitorados na bacia hidrográfica do Rio Guabirola.

		Q/C <sub>ss</sub> – Total		Q/C <sub>ss</sub> – Ascensão		Q/C <sub>ss</sub> – Recessão	
*Clas.	E	Equação	r <sup>2</sup>	Equação	r <sup>2</sup>	Equação	r <sup>2</sup>
Classe I	6	$y = 0,2867x + 1,753$	<b>0,9942*</b>	$y = 0,2883x + 1,746$	<b>0,9974</b>	$y = 0,2596x + 1,8029$	<b>0,9986</b>
	4	$y = 27,466x - 17,037$	<b>0,6052</b>	$y = 23,029x + 22,758$	<b>0,6252</b>	$y = 110,07x - 26,551$	<b>0,9255</b>
	5	$y = 13,251x + 8,2365$	<b>0,5443</b>	$y = 17,833x + 7,4927$	<b>0,8931</b>	$y = 14,498x - 9,1218$	<b>0,8931</b>
Classe II	10	$y = 15,776x + 0,6387$	<b>0,4539</b>	$y = 58,464x - 19,081$	<b>0,966</b>	$y = 17,1x - 9,6168$	<b>0,433</b>
	12	$y = 0,2816x + 174,96$	<b>0,0003*</b>	$y = 93,191x - 78,452$	<b>0,6994</b>	$y = 0,9907x + 142,79$	<b>0,0049</b>
	13	$y = 32,065x - 9,2872$	<b>0,711</b>	$y = 48,309x - 16,361$	<b>0,7665</b>	$y = 25,719x - 5,0771$	<b>0,9404</b>
	14	$y = 30,731x - 11437$	<b>0,8117*</b>	$y = 47,621x - 20,343$	<b>0,7921</b>	$y = 34,071x - 16,456$	<b>0,9525</b>
	19	$y = 39,593x - 30,875$	<b>0,6019</b>	$y = 47,07x - 10,854$	<b>0,6975</b>	$y = 30,633x - 26,609$	<b>0,9778</b>
Classe III	11	$y = 110,61x - 189,51$	<b>0,5724</b>	$y = 92,008x - 160,22$	<b>0,6517</b>	$y = 234,75x - 423,46$	<b>0,976</b>
	20	$y = 83,528x - 64,789$	<b>0,5294</b>	$y = 5,7572x - 0,5357$	<b>0,0297</b>	$y = 85,987x - 66,502$	<b>0,5375</b>
Classe IV	9	$y = 98,081x - 82,097$	<b>0,5023</b>	$y = 135,6x - 143,12$	<b>0,8606</b>	$y = 1083,3x - 2574,3$	<b>0,6207</b>
	18	$y = 19,197x - 19,171$	<b>0,9105*</b>	$y = 19,599x - 19,957$	<b>0,8917</b>	$y = 36,21x - 9816$	<b>0,8774</b>
	1	$y = 94,752x - 18,367$	<b>0,2214</b>	$y = 353,01x + 120,48$	<b>0,4696</b>	$y = 72,784x - 11,628$	<b>0,7897</b>
	2	$y = 67,784x - 6,1086$	<b>0,2272</b>	$y = 112,97x - 17,936$	<b>0,3921</b>	$y = 81,950x - 17,400$	<b>0,9188</b>
	3	$y = 107,71x + 24,366$	<b>0,7162</b>	$y = 46,373x + 21,946$	<b>0,0772</b>	$y = 0,0078x + 0,288$	<b>0,9288</b>
Classe V	7	$y = 0,0233x + 1,1522$	<b>0,7719*</b>	$y = 0,0193x + 1,105$	<b>0,8847</b>	$y = 0,0241x + 1,3444$	<b>0,9497</b>
	8	$y = 157,24x - 169,45$	<b>0,6351</b>	$y = 219,82x - 241,3$	<b>0,7366</b>	$y = 162,62x - 176,08$	<b>0,5896</b>
	15	$y = 17,744x + 4,5338$	<b>0,6061</b>	$y = 13,893x + 9,3905$	<b>0,4623</b>	$y = 19,551x + 2,1615$	<b>0,8019</b>
	16	$y = 65,14x - 37,205$	<b>0,5303</b>	$y = 42,608x - 26,882$	<b>0,4228</b>	$y = 76,97x - 45,906$	<b>0,7722</b>
	17	$y = 1178,1x - 1224$	<b>0,6391</b>	$y = 884,68x - 862,31$	<b>0,7224</b>	$y = 1003x - 1027$	<b>0,2673</b>
		<i>Mínima</i>	<b>0,0003</b>		<b>0,0297</b>		<b>0,2673</b>
		<i>Máxima</i>	<b>0,9942</b>		<b>0,9974</b>		<b>0,9986</b>
		<i>Média</i>	<b>0,61955</b>		<b>0,6195</b>		<b>0,7671</b>

\* Classes de Histerese, conforme a classificação de Williams (1989). E = Evento, na equação o y representa a Q (m<sup>3</sup>/s) vazão, e x representa na equação a C<sub>ss</sub> (mg/L).

Conforme a tabela 4, é possível verificar que os eventos 4, 5, 10, 12, 13, 14 e 19, possuem o valor da C<sub>ss</sub> RC maior que a C<sub>ss</sub> RD, esse motivo determina a curva histerese com sentido horário – *clockwise*, e valor do índice de histerese – IH, ser positivo. O inverso acontece com os eventos 11 e 20, pois possui o valor da C<sub>ss</sub> RD maior que o da C<sub>ss</sub> RC, caracterizando a curva de histerese com sentido anti-horário - *counterclockwise* e IH negativo. Os eventos 1, 2, 3, 7, 8, 15, 16 e 17, possuem as curvas de histerese classificadas como *figure eight*, e as histereses *figure eight* como as histereses *counterclockwise* também apresentaram o valor da C<sub>ss</sub> RD maior que o da C<sub>ss</sub> RC. Entretanto nesse caso a curva possui dois sentidos, um sentido inicial sendo horário e outro anti-horário que determina a histerese *figure eight*. Em todos os eventos classificados como curva de histerese *figure eight* a C<sub>ss</sub> RD possui valor maior que a C<sub>ss</sub>

RC, o que faz com que o valor do IH seja negativo como o IH das curvas de histerese *counterclockwise*. O evento 6, com a histerese *single – valued line*, e os eventos 9 e 18, com histerese *singleline plus loop*, foram classificados como sentido horário, devido ao valor da C<sub>ss</sub> RC ser superior que a C<sub>ss</sub> RD, e gerar IH positivo.

O valor do ramo da C<sub>ss</sub>, assim como a Q máxima e Q mínima, podem ser influenciado por dois fatores a P<sub>ant</sub> - precipitação anterior ao evento e o TDE - tempo de duração do evento. No evento 2, a P<sub>ant</sub> com 22,8 e 24 horas de TDE, podem ter influenciados na disponibilidade de uma quantidade maior de C<sub>ss</sub> anterior ao evento que foram transportadas pelo evento no dia de ocorrência. Outra questão é que a maioria dos eventos com IH negativo apresentou precipitação anterior o dia do evento. E segundo Lawler *et al.* (2006), o IH negativo significa áreas com disponibilidade de sedimento. O menor valor da IH -5,5, foi determinado pelo evento 17, e o maior IH 4,13, pelo evento 9. Os eventos 10 e 12 apresentaram os maiores valores de Q máxima correspondente ao IH positivo, evento 10 com Q<sub>máx.</sub> 7,10 (m<sup>3</sup>/s) e IH 2,94, e o evento 17 com Q<sub>máx.</sub> 41,6 (m<sup>3</sup>/s) e IH 1,48 (tab. 4).

**TABELA 04.** Resultado das variáveis hidrossedimentológicas e da histerese, para os eventos selecionados na bacia hidrográfica do rio Guabiroba, Guarapuava - PR\*

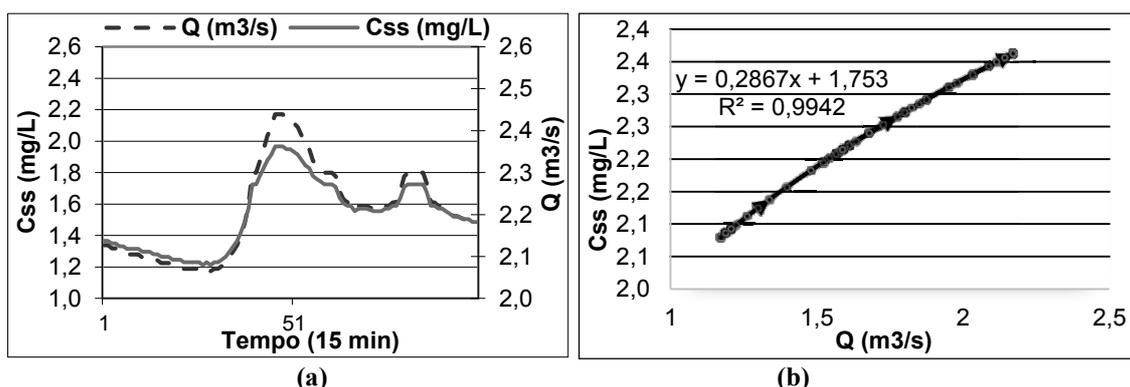
Evento	Data	TDE	P	P <sub>ant</sub>	Q <sub>máx</sub>	Q <sub>mín</sub>	Q <sub>cen</sub>	C <sub>ss</sub> RC	C <sub>ss</sub> RD	IH	Histerese
1	17/Jan/09	30h	16,6	16,4	0,66	0,26	0,46	15,81	20,09	-0,27	8
2	27/Fev/09	24h	16,8	22,8	0,54	0,27	0,41	16,76	17,29	-0,03	8
3	14/Mai/09	79h	41,8	1,8	0,79	0,14	0,46	5,11	21,53	-3,21	8
4	12/Out/09	10h	42,0	0,0	3,79	0,36	2,07	51,37	28,30	0,81	H
5	14/Out/09	16h	35,2	0,4	4,12	0,60	2,36	66,56	23,93	1,78	H
6	15/Out/09	24h	18,9	22,7	2,17	1,17	1,67	2,27	2,140	0,01	NID
7	18/Out/09	14h	15,0	16,9	3,66	1,20	2,43	25,86	44,21	-0,70	8
8	19/Out/09	16h	10,2	11,0	2,53	1,80	2,16	15,81	16,87	-0,06	8
9	20/Nov/09	37h	49,6	0,0	3,33	0,33	1,83	206,1	40,18	4,13	H
10	11/Dez/09	24h	69,0	0,0	7,10	0,37	3,74	184,3	46,75	2,94	H
11	17/Dez/09	19h	20,2	17,6	1,79	0,49	1,14	23,45	64,44	-1,74	AH
12	17/Dez/09	25h	43,4	17,6	41,6	0,49	21,0	227,9	91,69	1,48	H
13	24/Dez/09	23h	26,6	0,2	3,41	0,50	1,95	83,36	42,19	0,97	H
14	03/Jan/10	23h	9,6	1,8	1,47	0,58	1,03	30,25	18,66	0,62	H
15	10/Jan/10	25h	27,2	0,0	1,17	0,41	0,79	26,35	18,18	-0,44	8
16	11/Jan/10	26h	21,4	2,8	2,25	0,55	1,40	15,81	70,84	-3,47	8
17	13/Jan/10	12h	26,3	14,8	1,13	0,99	1,06	6,952	45,23	-5,50	8
18	13/Jan/10	11h	13,8	14,8	4,77	1,97	3,37	41,18	30,25	0,36	H
19	20/Jan/10	30h	35,8	0,6	3,53	0,58	2,06	69,77	41,18	0,69	H
20	22/Jan/10	27h	9,9	2,6	0,93	0,76	0,84	3,283	5,113	-0,55	AH

\* TDE - o tempo de duração do evento, é a soma do tempo de duração do evento (h); P - a precipitação no dia do evento (mm); P<sub>ant</sub> - a precipitação no dia anterior ao evento (mm); Q<sub>max</sub> - a vazão máxima do evento (L s - Q<sub>min</sub> a vazão inicial mínima do evento (m<sup>3</sup>/s); Q<sub>cen</sub> - a vazão média calculada para o evento (m<sup>3</sup>/s -1) ; C<sub>SS</sub> RC - a concentração de sedimentos em suspensão para a Q<sub>cen</sub> no ramo crescente (g L); C<sub>SS</sub> RD - a concentração de sedimentos em suspensão para a Q<sub>cen</sub> no ramo decrescente (g L-1-1); IH - a índice de histerese calculado para o evento; Histerese: H - o sentido horário, AH - o sentido anti-horário e 8 - o figura oito-1 ). O evento 6 por ser uma reta, não foi identificado – NID, com nenhum sentido de curva; para os eventos 9 e 18, foi considerado apenas o sentido da curva de histerese proposto por Lawler (2006), e não a classificação do modelo de Willians (1989).

Nos 20 eventos que foram caracterizados um evento apresenta figura de histerese *single-valued line* (única linha reta ou curva), sete eventos com figuras no sentido *clockwise loop* (curva no sentido horário), dois eventos formando figuras *conterclockwise loop* (curva no sentido anti-horário), dois eventos com figuras *single line plus loop* (linha única acrescida de uma volta), e oito eventos com curvas de histerese *figure eight* (figura oito).

### 5.2.1 Histerese *single – valued line*

O evento 6, fig. 8, apresenta o hidrograma e o sedimentograma praticamente sobrepostos, isso indica a significativa  $r^2$  0,99 da Q e C<sub>ss</sub>, e o maior coeficiente de determinação dos 20 eventos calculados. Essa relação linear indica Q e a C<sub>ss</sub> apresentaram resposta hidrológica sincronizada, isto ocorreu devido aos dois gráficos temporais possuírem uma direta sincronia, tendo picos simultâneos e comparáveis extensões, ao responder às formas de condições físicas do ambiente que às influenciaram. Como a máxima precipitada de 2,1 mm no total de 18,9 mm, resultando na C<sub>ss</sub> máx. de 58,6 (mg/L) e Q máx. de 2,36 (m<sup>3</sup>/s). Na seleção dos 20 eventos, esse evento obteve a única histerese *single-valued line*, na qual representou a simultaneidade no aumento C<sub>ss</sub> com o aumento da Q, confirmando o estudo de Williams (1989). No evento 6, não identificado nenhum sentido na histerese, devido a isso o IH não foi considerado por apresentar uma histerese em linha reta.

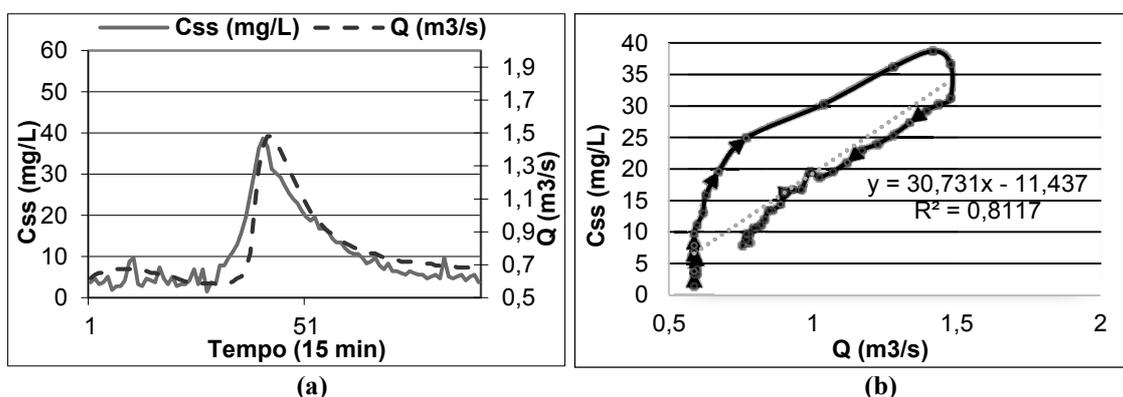


**Figura 08.** Evento 6 – (a) Hidrograma e sedimentograma, e (b) hidrossedimentograma - relação entre Q observada e C<sub>ss</sub> monitorada em intervalo de tempo (15min)

### 5.2.2 Histerese *clockwise loop*

A fig. 09, evento 14, exemplifica todos 7 eventos que obtiveram histerese *clockwise loop*. Os sete eventos são 4, 5, 10, 12, 13, 14 e 19, e o evento 14 foi selecionado

para representar os demais, por apresentar significativo coeficiente de determinação, com  $r^2 = 0,81$ . A histerese *clockwise loop* ocorre com pico a  $C_{ss}$  chegando primeiro ao pico que a  $Q$ , e posteriormente a  $C_{ss}$  decai antes da  $Q$  atingir o pico de ascensão, esse processo é de forma clara representada abaixo pelo hidrograma e sedimentograma (a). Os 7 eventos possuem a mesma similaridade do pico de  $C_{ss}$  anteceder e decair antes do pico de ascensão da  $Q$ . Em relação as particularidades de cada evento, os eventos 4 ( $r^2 = 0,60$ ), 5 ( $r^2 = 0,54$ ) e 13 ( $r^2 = 0,71$ ), apresentam dois picos de  $C_{ss}$ , um antes da ascensão da vazão e o segundo ao mesmo tempo do pico da  $Q$  (APÊNDICE B). Também ocorre dois picos de  $C_{ss}$  com os eventos 12 ( $r^2 = 0,0$ ) e 19 ( $r^2 = 0,60$ ), com um pico de menor valor antes do pico de maior proporção e valor de  $C_{ss}$ , e ambos antecedem o pico de  $Q$  (APÊNDICE B). O maior valor de  $C_{ss}$  pertence à classe II – Clockwise loop, no evento 12 com 886 mg/L, com o coeficiente  $r^2 = 0,0$ , isso significa que não existe nenhuma relação entre as variáveis  $Q$  e  $C_{ss}$ . Já o maior registro de precipitação total de 69 mm ocorreu durante o evento 10 ( $r^2 = 0,45$ ), e o TDE - tempo de duração dos eventos da classe II – clockwise loop com variação de 10 horas a 30 horas.

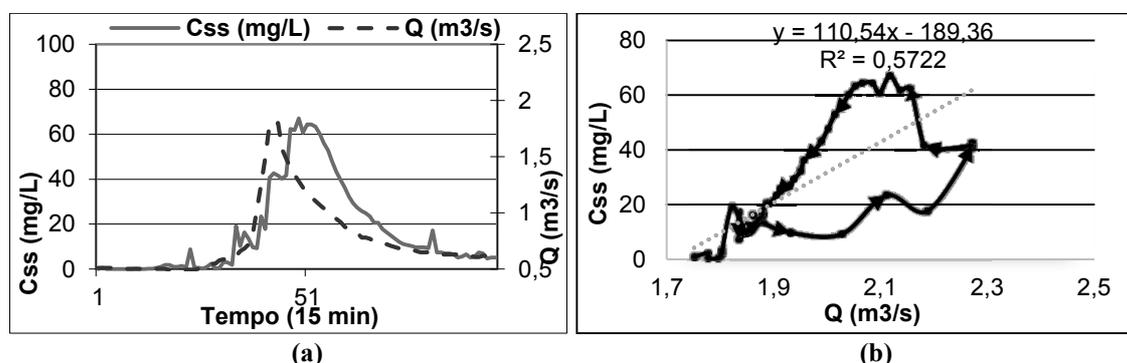


**Figura 09.** Evento 14 – (a) Hidrograma e sedimentograma, e (b) hidrossedimentograma - relação entre  $Q$  observada e  $C_{ss}$  monitorada em intervalo de tempo (15min)

### 5.2.3 Histerese counterclockwise loop

Na fig. 10, o evento 11, representa a classe III, que possui dois eventos, sendo o 11 e o 20, que possuem histerese *counterclockwise loop* (IIIa) e (IIIb), classificados conforme os modelos propostos por Williams (1989). No evento 11, é possível observar no hidrograma e sedimentograma, que a vazão chega ao pico antes da concentração de sedimento, já no evento 20, o pico máximo de vazão e concentração de sedimento são simultâneos (APÊNDICE C). O evento 20 possui o menor valor de  $C_{ss}$  (23,9 mg/L),  $Q$  (0,93 m<sup>3</sup>/s), e menor precipitação total (9,6 mm), dos eventos selecionados. É semelhante o coeficiente de ambos, o evento 11 ( $r^2 = 0,57$ ) e o evento 20 ( $r^2 = 0,52$ ), o que pode ser

entendido que a relação da Q e a C<sub>ss</sub> mostram proporção relativa nos dois eventos. Isso pode indicar que os sedimentos estão mais distantes por apresentarem um tempo de retardo em relação a Q.



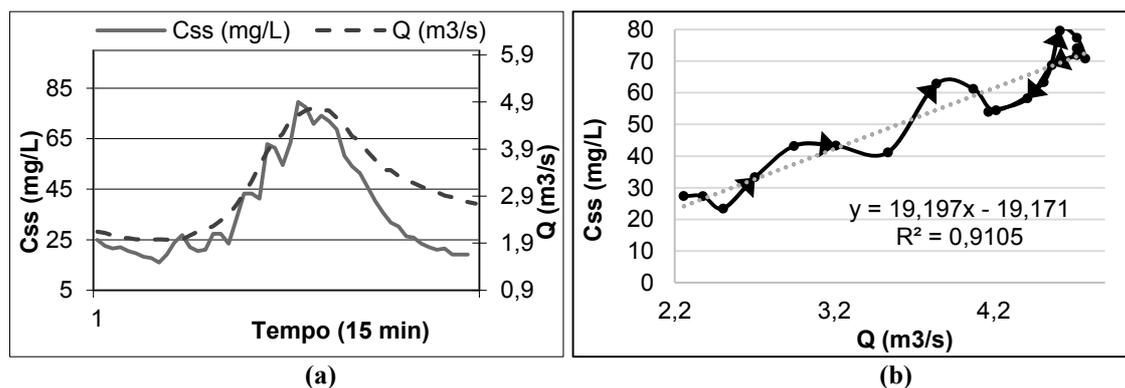
**Figura 10.** Evento 11 – (a) Hidrograma e sedimentograma, e (b) hidrossedimentograma - relação entre Q observada e C<sub>ss</sub> monitorada em intervalo de tempo (15min)

#### 5.2.4 Histerese *single line plus loop*

Na figura 11, o evento 18 representa a classe VI de histerese *single line plus loop* que é formada pelos eventos 9 e o 18. Segundo Willians (1989). Esse tipo de linha de histerese está relacionada as três classes anteriores, e por essa razão que as determinam possuem as mesmas características na composição do hidrograma e o sedimentograma. A histerese *single line plus loop*, é uma curva formada por características de outras curvas como a *single – valued line*, *clockwise loop*, ou a *counterclockwise loop*. No caso do evento 9 e 18, as suas histereses possui a caraterística de ser uma curva única acrescida de uma volta, o motivo da histerese ser uma única curva pertence a característica *single – valued line*, e por possuir uma volta pode ser tanto no sentido horário quanto no sentido anti-horário. E os eventos 9 e 18 possuem a histerese acrescida de uma volta no sentido horário, por isso foram considerados na tab. 4, com o IH no sentido horário conforme a classificação de Lawler (2006), porém conforme a classificação dos modelos de histerese de Williams (1989), pertence à classe VI de histerese *single line plus loop*.

No hidrograma e sedimentograma do evento 18 e 9 (APÊNDICE D), a C<sub>ss</sub> responde simultaneamente até o pico da vazão. No evento 18, a C<sub>ss</sub> decai mais lentamente ao contrário do evento 9, que o ramo rapidamente decresce. Segundo Baca (2010) a similaridade na ascensão da vazão com a C<sub>ss</sub> no ramo crescente, e as variáveis apresentando simultaneidade ao chegar ao pico, permite inferir que as fontes de sedimento estavam próximas ou, até mesmo providas de algum banco de sedimentos dentro do canal de drenagem.

Em ambos os eventos o sentido da curva de histerese foi horário e com valor positivo, e com diferença significativa na relação da  $Q \times C_{ss}$ , sendo ( $r^2 = 0,91$ ) para o evento 18, e para o 9 ( $r^2 = 0,50$ ). O evento 9 apresentou 321,9 (mg/L) de  $C_{ss}$ , enquanto o evento 18 apresentou 79,5 (mg/L) de  $C_{ss}$ , o maior valor de vazão 4,77 ( $m^3/s$ ) entre os dois eventos, foi do evento 18 mesmo obtendo menor  $C_{ss}$ , e o evento 9 atingiu 2,58 ( $m^3/s$ ) de  $Q$  máxima observada (tab. 2).



**Figura 11.** Evento 18 – (a) Hidrograma e sedimentograma, e (b) hidrossedimentograma - relação entre  $Q$  observada e  $C_{ss}$  monitorada em intervalo de tempo (15min)

### 5.2.5 Histerese *figure eight*

Na figura 12, o evento 3 representa todos os 8 eventos, sendo eles o evento 1, 2, 3, 7, 8, 15, 16 e o 17, que fazem parte da classe V, dos modelos classificados por Williams (1989). A *histerese figure eight*, é uma curva com início no sentido *clockwise* terminada no sentido *counterclockwise* ou o processo contrário, demonstra que a maioria dos eventos analisados dessa classe, podem ter áreas fontes próximas dos cursos de água, que disponibilizam sedimento para a rede de drenagens do rio Guabirola.

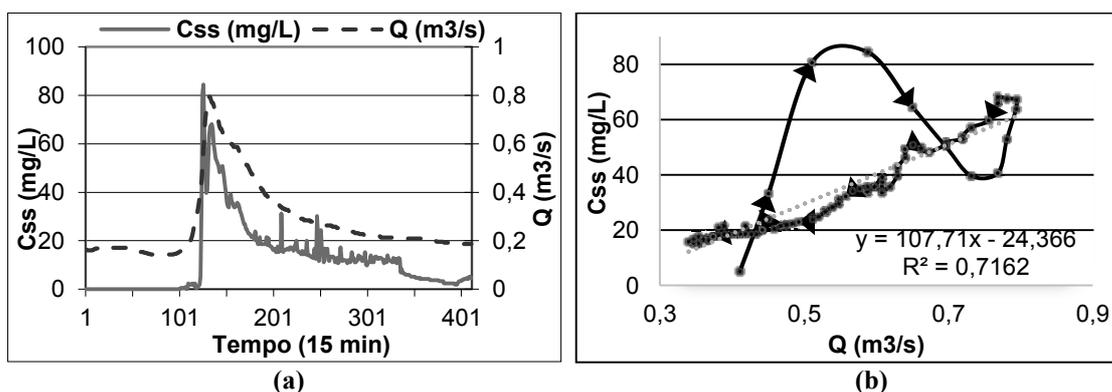
Nos eventos 1, 2, 3, 7, 8 e 16, o primeiro pico de  $C_{ss}$  apresentou valor superior aos demais picos de  $C_{ss}$  registrados nos eventos, o que pode dar a entender que esse primeiro pico com maior valor de  $C_{ss}$  é decorrente de sedimentos oriundos de áreas próximas ao canal de drenagem (VESTENA, 2009).

Os eventos 15 e 17 (APÊNDICE E), apresentaram dois picos de  $C_{ss}$  antecedendo o pico da  $Q$ , (Williams 1989; Seeger *et al.*, 2002), num primeiro momento há um pico menor e posteriormente um segundo pico maior antecedendo o pico da  $Q$ . Essa característica do sedimentograma, com ocorrência do segundo pico de  $C_{ss}$ , pode indicar que os sedimentos que chegam provem de áreas próximas, porém um pouco mais distantes que os outros eventos, notado pelo comportamento do sedimentograma (LOPES

et al., 2007). Como a carga de lavagem carregada da bacia hidrográfica, que pode influenciar a ocorrência do primeiro pico da bem antes do de vazão (VESTENA, 2009).

Os eventos 3, 7, 15 e 16, apresentam uma característica similar a respeito do tempo de decréscimo da curva de  $C_{ss}$ , com o declive do ramo descendente da  $Q$  mais acentuado que o ramo descendente da  $C_{ss}$ . Essa semelhança entre os eventos pode significar que após a ocorrência do pico da  $C_{ss}$ , a disponibilidade e o transporte de sedimentos são suficientemente elevados, fazendo com que a  $C_{ss}$  decresça lentamente com o tempo enquanto a  $Q$  decresce mais rapidamente (LEFRANÇOIS *et al.*, 2007).

A maior  $C_{ss}$  dentre os eventos da classe V, foi obtida pelo evento 17 com 172,0 (mg/L) e a menor 28,7 (mg/L) no evento 15, e o maior valor de  $Q_{máx}$ . 3,66 ( $m^3/s$ ) foi encontrado no evento 7. O menor valor de  $Q_{min}$ . 0,14( $m^3/s$ ) foi obtido no evento 3, que somou maior tempo de duração de 79 horas (tab.3 e 4).



**Figura 12.** Evento 03 – (a) Hidrograma e sedimentograma, e (b) hidrossedimentograma - relação entre  $Q$  observada e  $C_{ss}$  monitorada em intervalo de tempo (15min)

## 6. CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTO SUSPENSO E AS CARACTERÍSTICAS DA CHUVA

Para a comparação entre a concentração de sedimento suspenso e as características da chuva, foram utilizados alguns parâmetros já analisados anteriormente. Como a classificação dos cinco modelos de curva de histerese, segundo Williams (1989); e o cálculo do índice de histerese (IH), de acordo com Lawler *et al.* (2006). Esses resultados a partir da  $C_{ss}$ , foram analisados nos 20 eventos selecionados em conjunto com os tipos de chuva, classificados conforme Richardt (1986). As características da chuva sendo: tempo de duração da precipitação TDP (mm/h), intensidade média – IM mm/h, e outras informações relacionadas, como precipitação anterior ao evento –  $P_{ant}$ , precipitação máxima –  $P_{máx.}$ , também foram consideradas nessa análise durante o tempo de duração do evento – TDE (horas) (tab. 5).

Na tabela 5, para cada classe de histerese foram identificados os tipos de chuva conforme o evento. Na classe I (single – valued line), o tipo de chuva foi forte para o evento 6. A classe II (clockwise loop), possui sete eventos no total, sendo identificado para os eventos 4, 5, 12 e 13, o tipo de chuva forte e para os eventos 4, 14 e 19 o tipo de chuva moderada. Na classe III (counterclockwise loop), o evento 11 apresentou chuva moderada e o evento 20 chuva fraca. A classe IV (single line plus loop), obteve chuva forte para o evento 9 e chuva moderada para o evento 18. A classe V (figure eighth), com total de oito eventos, identificou o tipo de chuva moderada para os cinco eventos 2, 3, 15, 16 e 17; para os eventos 1 e 7, foram verificadas chuva forte e apenas o evento 8 apresentou o tipo de chuva fraca.

Nos vinte eventos selecionados (tab. 5), o tipo de chuva fraca foi identificado em apenas dois eventos, o tipo de chuva forte foi observado em oito eventos e o tipo de chuva moderada predominou em dez eventos. Nos oito eventos com o tipo de chuva forte, sete apresentaram as maiores  $C_{ss}$ , dos vinte eventos selecionados. Nesses sete eventos, as taxas  $C_{ss}$  variaram apresentando o maior valor de 886,0 (mg/L), obtido pelo evento 12 e dos maiores valores de  $C_{ss}$  o menor valor apresentou 107,6 (mg/L), pelo evento 1. A diferença dos eventos 12 e 1 em relação a taxa de  $C_{ss}$ , são devidos à desigualdade dos valores de  $P_{total}$  e IM; pois o evento 12 obteve 43,4 mm de  $P_{total}$  e 17,1 mm/h de IM, já o evento 1 obteve 16,6 mm de  $P_{total}$  e 7,7 de IM. Porém ambos os eventos apresentaram similaridade no TDP, TDE e IH positivos (tab.5).

O índice de histerese indica a classificação da curva de histerese de forma quantitativa, quando o IH = 1, significa que apresenta perfeita relação dos ramos crescente e decrescente da Css, e quando o IH = -1, significa o mesmo de forma inversa, assim pode-se identificar maiores ou menores magnitudes de Css no período de ascensão ou recessão no evento (LAWLER *et. al.*, 2006). Seguindo esse critério os eventos que apresentaram uma simetria mais próxima da perfeição, com ramos de Css proporcionais, foram os eventos 13 com IH = 0,97 e o evento 4 com IH = 0,81, ambos eventos com tipo de chuva forte e com intensidade semelhante. Todos os 10 eventos que obtiveram IH negativo, ou são histerese *figure eight* ou são *counterclockwise loop*, e os 10 eventos restantes apresentaram IH positivo e sentido horário da histerese (tab. 5).

**TABELA 05.** Resultado das classes da curva de histerese, dos tipos de chuva e algumas características de precipitação dos eventos monitorados na bacia hidrográfica do rio Guabiroba, Guarapuava - PR\*

CLASSES DE HISTERESE E CARACTERÍSTICAS DA CHUVA											
Classes de histerese	Evento	Data de início do evento	TDE hora	IH	Css (mg/L)	P <sub>total</sub> (mm)	P <sub>máx.</sub> (mm)	P <sub>ant</sub> (mm)	TDP mm/h	IM	Tipo de chuva
Classe I	6	15/10/09	24h	0,01	58,6	18,9	2,1	22,7	8,0	9,8	Forte
	4	12/10/09	10h	0,81	<b>119,8</b>	42,6	7,6	0,0	5,3	7,9	Forte
	5	14/10/09	16h	1,78	92,8	40,4	6,0	0,4	7,15	4,9	Moderada
	10	11/12/09	24h	2,94	<b>234,8</b>	69,0	8,8	0,0	8,15	8,4	Forte
Classe II	12	17/12/09	25h	1,48	<b>886,0</b>	43,4	24,4	17,6	2,45	17,7	Forte
	13	24/12/09	23h	0,97	<b>141,4</b>	26,6	8,8	0,2	3,45	7,7	Forte
	14	03/01/10	23h	0,62	38,6	9,9	3,2	1,8	2,00	3,2	Moderada
	19	20/01/10	30h	0,69	<b>173,3</b>	35,8	7,0	0,6	5,15	6,9	Moderada
Classe III	11	17/12/09	19h	-1,74	67,09	20,2	6,2	17,6	3,45	5,9	Moderada
	20	22/01/10	27h	-0,55	23,9	9,6	2,8	2,6	9,15	1,0	Fraca
Classe IV	9	20/11/09	37h	4,13	<b>321,9</b>	49,6	21,4	0,0	5,45	9,1	Forte
	18	13/01/10	11h	0,36	79,5	13,8	3,2	14,8	3,45	4,0	Moderada
	1	17/01/09	30h	-0,27	<b>107,6</b>	16,6	6,6	16,4	2,15	7,7	Forte
	2	27/02/09	24h	-0,03	63,9	22,4	4,8	22,8	3,00	5,6	Moderada
Classe V	3	14/05/09	79h	-3,21	84,4	41,8	2,6	0,0	5,30	4,0	Moderada
	7	18/10/09	14h	-0,70	<b>122,8</b>	15,1	3,2	16,9	1,45	10,3	Forte
	8	19/10/09	16h	-0,06	49,3	10,2	2,0	11,0	4,00	2,5	Fraca
	15	10/01/10	25h	-0,44	28,78	27,2	5,4	0,0	10,1	2,6	Moderada
	16	11/01/10	26h	-3,47	<b>130,5</b>	21,4	6,4	2,8	3,15	6,7	Moderada
	17	13/01/10	12h	-5,50	<b>172,0</b>	23,6	4,6	14,8	5,00	5,2	Moderada

\*Nota – Classes de histerese: classe I (*single – valued line*), classe II (*clockwise loop*), classe III (*counterclockwise loop*), classe IV (*single line plus loop*) e classe V (*figure eight*), de acordo com Williams (1989); TDE - o tempo de duração do evento, é a soma do tempo de duração do evento (h); IH - a índice de histerese calculado para o evento, segundo Lawler *et al.*(2006); Css (mg/L) máxima horária observada; P<sub>total</sub> - precipitação total no dia do evento (mm) 15 min; P<sub>máx.</sub> - precipitação máxima horária observada no evento (mm) 15 min; P<sub>ant</sub> - a precipitação no dia anterior ao evento (mm); TDP - o tempo de duração da precipitação durante o evento (mm/h); IM – intensidade média da chuva (mm/h) durante o TDP e os tipos de chuva: fraca (até 2,5 mm/h), moderada (de 2,5 a 7,5 mm/h) e forte (superior a 7,5 mm/h), conforme Reichardt (1986).

As características da precipitação e seu comportamento hidrológico são fatores determinantes para a relação de concentração de sedimento suspenso e vazão. Como a

influência dos tipos de chuvas na dinâmica hidrossedimentológica, conforme as características da chuva (duração, intensidade e volume). E essas características influenciam mais ou menos em questões como escoamentos superficial, remoção das partículas, transporte, deposição dos sedimentos e onda de vazão. Diante da relevância do assunto, o próximo tópico tratara da relação dessas variáveis na dinâmica hidrossedimentológica.

### **6.1 Relação da Concentração de sedimento suspenso, precipitação e vazão**

Neste trabalho a seleção dos eventos foram realizadas levando em consideração os períodos mais chuvosos do ano, devido a isso foram obtidos cinco sequências de eventos, essa sequência é formado por eventos que ocorreram um sequência do outro. A primeira sequência é composta dos eventos 4, 5 e 6, a segunda sequência pelos eventos 7 e 8, a terceira pelos eventos 11 e 12, a quarta integra os eventos 15, 16, 17 e 18 e por fim a quinta os eventos 19 e 20. A segunda e a quarta sequência, são formadas por eventos com sentido anti-horário, e os eventos 11 e 20 da terceira sequência também foram estabelecidos como anti-horários. Para Seeger *et al.* (2004), a maioria das histereses com sentido anti-horário podem ser explicadas, pelo maior volume precipitado e/ou pela condição de umidade antecedente ao evento, devido a eventos anteriores que favoreceram o aumento da umidade do solo (tab. 5).

A precipitação é o principal fator na quantidade de  $C_{ss}$  no evento, diante disso foram selecionados alguns hietogramas e sedimentogramas por classe de histerese para representar todos os eventos contidos na classe. No panorama geral podemos identificar algumas semelhanças entre os eventos, sendo a primeira, onde todos os eventos que obtiveram valor de  $C_{ss}$  maior que 100 (mg/L), também apresentaram maiores volumes precipitados, com exceção de dois eventos que tiveram mais de 40 mm de  $P_{total}$  e não atingiram as 100 (mg/L), porém obtiveram valores próximos, são os eventos 5 e 3 (tab.5).

Segundo Williams (1989), o sedimentograma e a relação  $C_{ss}$  versus  $Q$  dependem: (i) do tempo e da quantidade de sedimento que chega ao local de medição e (ii) da proximidade da fonte de sedimento para o local de medição. Ainda, pode-se considerar que o tempo de percurso do sedimento em suspensão é relativo ao tempo de percurso da onda de água. Considerando esse diagnóstico, foi analisado a influência das características da chuva entre relação  $C_{ss}$  versus vazão, nos 20 eventos selecionados, conforme as classes de histerese. A bacia hidrográfica do rio Guabiroba apresentou todos

os tipos de curva de histerese, sobre isso Lenzi e Marchi (2000), relata que não existe um único tipo de curva para uma bacia hidrográfica.

### **6.1.1 Histerese single – valued line**

O evento 6 (APÊNDICE A), é o único evento que possui *histerese single – valued line* da classe I. Nesse evento é possível observar que os picos de  $C_{ss}$  no sedimentograma acompanha as respostas dos picos de chuva no hietograma. Foi precipitado um volume de 18,9 mm em 8 horas, apresentando basicamente em dois picos de chuva que foram distribuídas em 24 horas totais de duração do evento. Conforme terminou o primeiro e maior pico de chuva iniciou o pico de  $C_{ss}$  com máxima de 58,6 (mg/L) (2,17 m<sup>3</sup>/s). Diante disso o evento apresentou precipitação com simultaneidade tanto em relação a resposta da  $C_{ss}$ , quanto em relação à  $Q$ , tanto que esse evento apresentou melhor índice de relação linear ( $r^2 = 0,99$ ), dos 20 eventos selecionados. A forte relação entre estas variáveis sugere que este evento apresentou uma resposta direta na vazão e na produção de sedimentos durante eventos de chuva (Zabaleta *et al.*, 2007).

### **6.1.2 Histerese clockwise loop**

A classe II de histerese *clockwise loop* (APÊNDICE B), possui oitos eventos, sendo o evento 4, 5, 10, 12, 13, 14 e 19. Os eventos 4, 5, 12, 13 e 19, possuem uma semelhança na presença de dois picos antecedentes ao pico da vazão. Essa característica pode ser entendida que o primeiro pico de  $C_{ss}$  é provido de sedimentos próximos ao canal de drenagem Seeger *et al.*, (2004). Na BRHG, de acordo com os estudos de Thomaz *et al.* (2008) e Thomaz *et al.* (2014), as estradas rurais apresentam-se como um dos principais fatores de conexão entre as vertentes e o canal de drenagem, resultando no transporte de altos valores de  $C_{ss}$ , durante os eventos de chuva (fig. 13). O segundo pico de  $C_{ss}$ , significa que os sedimentos são provenientes de áreas um pouco mais distantes, mas não muito, pois esse segundo pico também é antecedente ao da  $Q$ . Em todos os eventos dessa classe, o pico de  $C_{ss}$  antecede o da Vazão, essa característica da  $C_{ss}$  no sedimentograma, pode ser entendida como significativo papel das estradas rurais em oito dos vinte eventos, cerca de 40% desse tipo de histerese corresponde a fonte de sedimento sendo a estrada rural.



**Figura 13.** Escoamento superficial em estrada rural e entrada de sedimento no córrego, na BHRG. (09/04/2010) – Fonte: Thomaz *et al.* (2014)

Nos eventos 10 e 12 é possível observar a interferência que o TDP e o  $P_{ant}$ , podem influenciar na  $C_{ss}$  de eventos com até maiores volumes precipitados. O evento 12, apresentou um volume de chuva de 43 mm, com precipitação concentrada em 2,4 horas, um tempo de duração menor que do evento 10, que obteve 69 mm em 8,1 horas de duração, com chuva distribuída lentamente. O evento 10 obteve maior volume precipitado que o evento 12, e mesmo com menor volume de precipitação o evento 13 obteve uma quantidade maior de  $C_{ss}$ . Esse resultado pode estar relacionado com umidade antecedente do solo originada de precipitações anteriores, e também à disponibilidade de sedimento próximo ao canal de drenagem, que mesmo em pouco tempo de duração de precipitação alcançou alta  $C_{ss}$ . A disponibilidade de sedimento na área, poderia estar condicionada pela época de manutenção das estradas rurais, que revolvem o solo e com a chuva é destinado ao canal de drenagem, observado  $C_{ss}$  no evento 12 de 886,0 (mg/L), no 10 de 234,8 (mg/L), no 19 de 173,3 (mg/L), no 13 de 141,4 (mg/L) e no 4 119,8 (mg/L).

O evento 14 apresenta a menor  $C_{ss}$  da classe II, porém a maior coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,81$ ), essa relação da  $C_{ss}$  versus  $Q$ , refere-se à similaridade das características de precipitação com a  $C_{ss}$ - $Q$ . Conforme a tabela 5, e o hietograma, sedimentograma e hidrograma (APÊNDICE B), foi possível observar que ao passo que cessa a precipitação, as curvas de  $C_{ss}$  e  $Q$  iniciam a ascensão simultaneamente até o pico e decrescem lentamente. Nesse caso a proporcionalidade de todos os fatores, chuva, sedimento e descarga líquida, responderam de forma equivalente as interações entre si e com o ambiente.

Os eventos da classe II, englobam na ocorrência de seus eventos a as três práticas agrícolas mais importantes, plantio, trato das culturas e colheita. Conforme o calendário agrícola elaborado por Thomaz (2007), os eventos 4 e 5 ocorreram em época de plantio

das culturas do milho e feijão, os eventos 10, 12 e 13, sucederam no período de trato das culturas (capina/herbicida) e os eventos 14 e 19, no tempo de colheita das culturas acima mencionadas. A agricultura influencia na produção de sedimento com os processos erosivos e revolvimento do solo no plantio, capina e colheita especialmente do feijão. Então as C<sub>ss</sub> da classe de histerese II, possuem duas grandes provedoras de sedimento, podendo ser esse providos de áreas agrícolas e/ou estradas rurais, além da própria calha fluvial.

### **6.1.3 Histerese counterclock wise loop**

Os eventos 11 e 20, da classe III de histerese *counterclockwise loop* (APÊNDICE C), apresentaram relação semelhante aos eventos 10 e 12. O evento 11 como o evento 12 teve 17,6 mm de precipitação anterior. O evento 11 com 3,4 horas de duração de precipitação apresentou maior valor C<sub>ss</sub> (67,9 mg/L), que o evento 20 com 9,1 horas de TDP, obteve menor valor de C<sub>ss</sub> 23,9 (mg/L) (tab.5). O sedimentograma do evento 6 apresentou dois picos menores de C<sub>ss</sub> após o pico máximo, o que não ocorreu no evento vinte, mas ambos picos de C<sub>ss</sub> antecedem o pico de vazão, essa característica demonstra que os sedimentos podem estar chegando de áreas afastadas. De acordo com a literatura o pico de C<sub>ss</sub> ocorre depois do pico da vazão, acontece devido à incorporação de áreas que não estão constantemente conectadas a rede canais como as áreas de deposição de sedimentos não consolidada de eventos antigos, deste modo, estas áreas irão se conectar aos canais de drenagem quando o escoamento for gerado por toda bacia hidrográfica (SEEGER *et al.*, 2004).

### **6.1.4 Histerese single line plus loop**

A classe IV de histerese *single line plus loop* (APÊNDICE D), possuem no total dois eventos 9 e 18, que apresentaram algumas diferenças, começando pela ocorrência do tipo de chuvas forte no evento 9 e moderada no evento 18. Essa diferença influência na C<sub>ss</sub>, o evento 9 obteve 321,9 mg/L de C<sub>ss</sub> e Q<sub>max</sub> 3,33 (m<sup>3</sup>/s), enquanto o evento 18 obteve apenas 79,5 mg/L de C<sub>ss</sub>, porém valor superior de Q<sub>max</sub> 4,77 (m<sup>3</sup>/s). Conforme o hietograma a precipitação ocorreu de forma concentrada no evento 9, enquanto no evento 18 foi mais espaçada. O evento 9 não apresentou chuva antecedente, o que pode influenciar em maior quantidade de sedimento disponível para ser deslocado com mais facilidade nos 49,6 mm de chuva, em 37 horas de duração do evento - TDE. E ao contrário

do evento 9, o evento 18 apresentou 14,8 mm de  $P_{ant}$ , dificultando maior aporte de sedimento superior à 79,5 mg/L, para ser transportado em 13,8 mm de  $P_{total}$ , e em 11 horas de TDE.

### 6.1.5 Histerese figure eight

Os eventos 1, 2, 3, 7, 8, 15, 16 e 17 (APÊNDICE E), fazem parte da classe V de histerese *figure eight*, essa classe apresentou os três tipos de chuva, com os oito eventos que possui. Os eventos 3 e 17, apresentaram o tipo de chuva moderada, mas essa semelhança não foi determinante para obterem valores de  $C_{ss}$  parecidos. O maior TDE dos 20 eventos totais, foi obtido pelo evento 3 com 79 horas de TDE e  $Q_{max}$  0,79 (m<sup>3</sup>/s), já o evento 17 apresentou apenas 12 horas de TDE e  $Q_{max}$  3,33 (m<sup>3</sup>/s). Em contra partida às informações anteriores, o evento 17 obteve  $C_{ss}$  máxima de 172 mg/L e o evento 3 somente 84,4 mg/l de  $C_{ss}$  máxima. Nesse caso o que pode ter influenciado na  $C_{ss}$  do evento, foi o TDE e a  $P_{ant}$  de 14,8 mm, pois conforme o sedimentograma a curva de sedimento do evento 3 alcança o pico rapidamente, ao contrário do que acontece no evento 17, que a curva cresce lentamente. Esses eventos possuem características diferentes em relação a ramo crescente de  $C_{ss}$ , o evento 3 não apresenta picos antes da  $C_{ss}$  máxima, já o evento 17 apresenta pico menor com valor de  $C_{ss}$  19,1 (mg/L); o evento 3 apresenta um sequência de picos menores e com valores decrescentes apenas depois do pico máximo de  $C_{ss}$ .

Os eventos 1, 2, 7, 15 e 16 (APÊNDICE E), conforme o sedimentograma apresentam um pico de menor valor e menor proporção visual depois do pico máximo do  $C_{ss}$ . No sedimentograma esses picos de  $C_{ss}$  posteriores ao pico máximo, respondem de forma proporcional aos intervalos e aos valores máximos das precipitações dentro desses agrupamentos de precipitação. Desses os eventos 1, 2, 7 e 16 obtiveram, o evento 2 foi o que obteve maior volume de  $P_{ant}$  com 22,8 mm, e o evento 15 não apresentou  $P_{ant}$  e obteve o menor valor de  $C_{ss}$  da classe V. Os eventos 7, 8, 15 e 16 além de apresentar pico de  $C_{ss}$  anterior à máxima de  $C_{ss}$  e também apresentaram posteriormente picos menores.

A presença dos picos de  $C_{ss}$  máxima que antecede em todos os eventos dessa classe V ao pico de  $Q$ , o que demonstra que os sedimentos chegaram de fontes próximas ao canal de drenagem, como as estradas pode atuar com contribuição direta de sedimento

para o canal de drenagem, essas características de contribuição das estradas rurais são responsáveis por 40% das histereses *figure eight*. Para Thomaz *et al.* (2014), os valores mais elevados C<sub>ss</sub>, possuem significava relação com contribuição das estradas rurais, com efeito cumulativo das fontes de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Guabiroba.

O evento 8 (APÊNDICE E), formou uma figura com vários oitos, essa multiplicação das *figures eight*, representam a sincronia das variáveis logo após ocorrer o soerguimento do pico, que manifesta a alta concentração de sedimento chegando rapidamente no canal de drenagem (WILLIAMS, 1989; MINELLA *et al.* 2011). Essa multiplicação de picos de C<sub>ss</sub>, pode ser explicada pelas estradas sobreporem-se a rede drenagem, e contribuindo de forma rápida com a disponibilidade de sedimento para o canal de drenagem.

Assim como a os eventos da classe II de histerese, englobam a ocorrência das três práticas agrícolas mais importantes, como o plantio, o trato das culturas e a colheita, como também foi observado nos eventos da classe V histerese. Os eventos 7 e 8 ocorreram na época de plantio das culturas de milho e feijão, o evento 1 no período de trato das culturas e início de colheita, os eventos 2, 3, 15, 16 e 17 no tempo de colheita das respectivas culturas acima. Porém a agricultura é uma fonte de contribuição com tempo maior de atraso, em relação a contribuição de sedimento das estradas rurais não pavimentadas.

Os eventos com histerese *figures eight*, apresentaram similaridade na taxa de aumento da concentração de sedimentos em suspensão em relação a taxa da vazão, além do pico da concentração de sólidos suspensos ocorrer primeiro, e com mais de um pico de C<sub>ss</sub> antes ou depois da C<sub>ss</sub> máxima (WILLIAMS, 1989; SEEGER *et al.*, 2002; LOPES *et al.* 2007; LEFRANCOIS *et al.*, 2007; VESTENA, 2009; MINELLA, 2011).

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As principais considerações do presente trabalho, que teve por objetivo analisar a relação da concentração de sedimento e vazão na bacia hidrográfica do rio Guabiroba, na área rural de Guarapuava – PR. Foram realizadas por meio de análises qualitativas e quantitativas das curvas de histereses, para alcançar tal objetivo.

As classes II *clockwise loop* e V *figure eight*, juntas representam cerca de 80% dos vinte eventos analisados, e ambas as classes apresentaram resultados conforme os sedimentogramas e hidrogramas, que suas áreas de contribuição de sedimentos indicam que as estradas rurais por estarem próximas ou praticamente sobrepostas ao canal de drenagem, atuam como uma fonte de contribuição rápida. Já a agricultura foi observada como uma fonte de contribuição no período de plantio do milho e feijão, porém com um tempo maior de retardo em relação as estradas rurais.

A classe I de histerese *single – valued line*, com apenas o evento 6, apresenta um coeficiente de determinação mais significativa entre a Q e a C<sub>ss</sub>, com  $r^2 = 0,99$ . Porém em relação ao IH, não foi considerado seu valor, pois a histerese obteve uma reta, não sendo possível identificar um sentido da histerese.

A classe II de histerese *clockwise loop*, apresenta os eventos 4, 5, 10, 12, 13, 14 e 19, essa classe possui eventos com maiores valores de C<sub>ss</sub>, como o evento 12 que obteve o maior valor de C<sub>ss</sub> 886,0 (mg/L). As maiores C<sub>ss</sub> podem estar correlacionas com influência das características de precipitação, em relação a variação das características P<sub>ant</sub>, P<sub>total</sub>, TDP e TDE. O coeficiente de determinação da C<sub>ss</sub> versus Q, do evento 14 apresentou a maior coeficiente de determinação com  $r^2 = 0,81$ , e o evento 12 não apresentou nenhuma relação entre as variáveis, com  $r^2 = 0,0$ . O índice de histerese – IH, mais significativo de todos os vinte eventos foram obtidos pelos eventos, 4 com IH = 0,81, e o evento 13 com IH = 0,97.

A classe III de histerese *counterclockwise loop*, apresentou dois eventos com características distintas, o evento 11 ( $r^2 = 0,57$ ), e o evento 20 ( $r^2 = 0,52$ ). Os eventos 11 e 20, mesmo com o coeficiente de determinação com valor semelhante, obtiveram valores C<sub>ss</sub> com magnitudes diferentes. O IH negativo nos dois eventos, representam pico de Q antecedente ao C<sub>ss</sub>, o que significa que a classificação qualitativa inicial estava certa.

A classe IV de histerese *single line plus loop*, com os eventos 9 e 18, apresentaram resultados que ambos receberam influência das características da precipitação na C<sub>ss</sub> e Q. O evento 9 não obteve P<sub>ant</sub>, porém apresentou maior TDE (37 horas) e TDP (5,4

horas); essas características podem ter direcionado o valor elevado de  $C_{ss}$  (321,9 mg/L). No evento 18, foi observado o contrário, pois o mesmo apresentou  $P_{ant}$  (14,8 mm), e menor tempo de TDE (11 horas) e TPE (3,4 horas). O coeficiente de determinação para o evento 9, de  $C_{ss}$  versus vazão foi de  $r^2 = 0,50$ , e para o evento 18,  $r^2 = 0,91$ .

A classe de histerese V *figure eight*, possuem oito eventos, sendo eles 1, 2, 3, 7, 8, 15, 16 e 17; e todos apresentaram IH negativo confirmando a classificação inicial da histerese e seu sentido. Nessa classe foi possível verificar que precipitação e suas características, influenciaram na  $C_{ss}$  em relação ao TDE e TDP, o que pode ser indicativo da influência dessas variáveis na  $C_{ss}$ .

Os coeficientes de determinação dos vinte eventos, apresentaram valores de  $C_{ss}$  versus  $Q$  com média de  $r^2 = 0,5$ . Esse valor sugere que existem outras variáveis no controle relacionadas a vazão, como os tipos de chuva e as características preponderantes de precipitação e as novas fontes de sedimentos que podem ser desencadeadas pelas estradas rurais e as atividades agrícolas, entre outros agentes modificadores do ambiente, que não puderam ser reconhecidas devido a escala de amostragem.

## 7. REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. Os Domínios Morfoclimáticos da América do Sul: Primeira Aproximação. *Geomorfol.* 52:1-21, 1977.
- ALMEIDA FILHO, G.S. Processos erosivos urbanos. In: POLETO, C. **Ambiente e Sedimento**. Porto Alegre: ABRH, 2008. cap. 2, 59 - 60.
- AZEVEDO NETTO, J.M. de. **Manual de saneamento de cidades e edificações**. São Paulo: PINI Editora, 1991. 220p.
- BAČA, P. Hysteresis effect in suspended sediment concentration in the Rybárik basin, Slovakia/Effet d'hystérèse dans la concentration des sédiments en suspension dans le bassin versant de Rybárik (Slovaquie). **Hydrological Sciences Journal**, v. 53, n. 1, p. 224-235, 2008.
- BEUSELINCK, L. STEEGEN, A. GOVERSS, G. NACHTERCAELE, J. TAKKEN, I. POESEN, J. Characteristics of sediment deposits by major rainfall events in small catchments in the Belgian Loam Belt. *Geomorphology*, v.32, 69-82, 2000.
- BERTONI, J; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 7. ed. São Paulo: Ícone, 2010. 75-77p.
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R.D.; SANTOS, G.F. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. Vs. 1 e 2. Florianópolis: Editora da UFSC, 1994.
- BORTULUZZI, E.C. PETRY, C. Partículas Minerais da Rocha ao Sedimento. In: POLETO, C. **Ambiente e Sedimento**. Porto Alegre: ABRH, 2008. cap. 1, 1 - 11.
- BORDAS, M. P.; SEMMELMANN, F. R. Elementos de engenharia de sedimentos. In: TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. P. 915-943.
- BRADY, N.C. WEIL, R.R. Elementos da Natureza e propriedades do solo. 3ª Ed. Brohman Editora. Porto Alegre- RS. 2013.
- BRIERLEY, G.; FRYIRS, K. A.; JAIN, V. Landscape connectivity: the geographic basis of geomorphic applications. *Area*, v. 38 (2), p. 65-174, 2006.
- BROOKS, K.N.; FOLLIOTT, P.F.; GREGERSEN, H.M. & THAMES, J.L. *Hydrology and the management of watersheds*. Ames, Iowa State University Press, 1991. 392p.
- CARVALHO, N. O. *Hidrossedimentologia prática*. Rio de Janeiro: **CPRM**, 1994.
- CARVALHO, N. O. *Hidrossedimentologia Prática*. 2ª ed. Atualizada. Rio de Janeiro: **Interciência**, 2008, 599 p.

- CARVALHO, N. O. Erosão Crescente na Bacia do São Francisco. Revista Brasileira de Engenharia, Caderno de Recursos Hídricos. Vol. 13 , Nº 2, Dezembro/1995. pp. 5-19.
- CARVALHO, A. M. G. Geologia Sedimentar - Volume I. **Âncora** Editora, Lisboa, 2003.
- CARVALHO, D. F.; MONTEBELLER, C. A.; FRANCO, E. M.; VALCARCEL, R.; BERTOL, I. Padrões de precipitação e índices de erosividade para as chuvas de Seropédica e Nova Friburgo, RJ. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, n.1, p.7-14, 2005.
- CARVALHO, D.F. CRUZ, E.S. PINTO, M.F. SILVA, L.D.B. GUERRA, J. G. M. Características da chuva e perdas por erosão sob diferentes práticas de manejo do solo. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v.13, n.1, p.3-9, 2009.
- CHAVES, H.M.L. Análise global de sensibilidade dos parâmetros da Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE). R. Bras. Ci. Solo, 15:345-350, 1991.
- CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia. **Edgard Blücher**. São Paulo, 1980, 174 p.
- CUNHA, M. C. THOMAZ, E.L. VESTENA, L.R. Avaliação da eficácia de medidas de controle de sedimentos (caixas de contenção) em estradas rurais não pavimentadas na bacia hidrográfica do Rio das Pedras, Guarapuava-PR. Anais XVI Encontro Nacional Dos Geógrafos. Porto Alegre-RS. 2010.
- CUNHA, M. C. **Caracterização das estradas rurais não pavimentadas como elementos presentes na paisagem da bacia hidrográfica do rio das Pedras, Guarapuava-PR.** Rev. GEOMAE - Campo Mourão, PR. v.1n.2, p.73 – 91, 2ºSem 2010.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006.
- ESTEVES, F. A. Fundamentos de limnologia. Rio de Janeiro: **Interciência**, 1998. P.190-207.
- FLANAGAN, D. C.; FOSTER, G. R.; Moldenhauer, W. C. Storm pattern effect on infiltration, runoff and erosion. Transactions of the **ASAE**, v.31, n.2, p.414-420, 1988.
- IBGE. Manual Técnico de Uso da Terra. 2. ed., Rio de Janeiro: IBGE, 2006.
- JANSSON, M. B. Determining sediment sources areas in a tropical river basin, Costa Rica. **Catena**, v.47, p.63-84, 2002.
- HASNAIN, S. I.; THAYYEN, R. J. Discharge and suspended-sediment concentration of meltwaters, draining from the Dokriani glacier, Garhwal Himalaya, India. Journal of Hydrology. v. 218, p. 191-198, 1999.
- HOROWITZ, A. J. Determining annual suspended sediment and sediment associated trace element and nutrient fluxes. **Science of the Total Environment**, Atlanta, V. 400, p. 315 – 343, 2008.

KLAR, A.E. A água no sistema solo-planta-atmosfera. São Paulo: Nobel, 1984.488p

KLEIN, M. Anti clockwise hysteresis in suspended sediment concentration during individual storms. **Catena**, v.11, p.251-257, 1984.

LAWLER, D. M., PETTS, G. E.; FOSTER, I. D. L.; HARPER, S. 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*, v.360, p.109-126, 2006.

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, n. 15, p.2923–2933, 2007.

LENZI, M.A., MARCHI, L. (2000). “Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites.” *Catena*, 39, p. 267-282.

LOPES, N. H. Y. KOBİYAMA, M.; SANTOS, I. Relação entre concentração de sedimentos em suspensão e vazão em microbacias experimentais na região norte do estado de Santa Catarina, Brasil. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo: **ABRH, Anais**, CD-rom, 12p, 2007.

LOMBARDI-NETO, F. & PASTANA, F.I. Relação chuva-perdas por erosão. *Bragantia*, 31:227-234, 1972.

LUIZ, J.C. as unidades de paisagem na bacia do rio Guabiroba Guarapuava-PR e a fragilidade ambiental. Dissertação de mestrado do programa de pós- graduação- UEM. 2007.p.52-200.

MARTINS M.E., COIADO, E.M. (1999). “Produção de sedimentos em microbacia agrícola cultivada com cana-de-açúcar.”XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte, MG.

MINELLA, J. P. G., MERTEN, G. H., REICHERT, J. M.,SANTOS, D. R. Identificação e implicações para a conservação do solo das fontes de sedimentos em bacias hidrográficas. *R. Bras. .Ci. Solo*, 31:1637-1646, 2007.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G.; CUNHA, R. B.; GOMES, S. T. Avaliação da descarga sólida do leito em rio de montanha com uso do amostrador BLH-84. VIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimento, 2008.

MINELLA, J. P. G, MERTEN, G. H. Monitoramento de bacias hidrográficas para identificar fontes de sedimentos em suspensão. *Ciência Rural* [On-line] 2011, 41 (Marzo-Sin mes) : [Data de consulta: 17 / março / 2014] Disponível em:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33118935010>> ISSN 0103-8478.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; MAGNAGO, P. Análise qualitativa e quantitativa da histerese entre vazão e concentração de sedimentos durante eventos hidrológicos. **Rev. Bras. Eng. Agri. Amb.** v.15, n.12, p.1306–1313, 2011.

MINELLA, J.P. MERTEN, G.H. CLARKE, R.T. Método “fingerprinting” para identificação de fontes de sedimentos em bacia hidrográfica rural. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB, UAEEA/UEFG – <http://www.agriambi.com.br>. v.13, n.5, p.633–638, 2009.

MORGAN, R. P. C. Soil erosion and conservation. 3. ed. Padstow: **Blackwell Publishing**, 2005.

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.

NORDIN JR., C.F. (1985). “The sediment load of rivers.” In: Rodda, J.C. (organizador) *Facets of Hydrology Volume II*. Editora John Wiley & Sons Ltd, EUA.

PEREIRA, M.A.F. processos hidrossedimentológicos em diferentes escalas espaço temporais no Bioma Mata Atlântica. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

PERETTO, G. T. Estradas rurais sem pavimentação como elemento de conectividade na transferência de sedimento e água em cabeceiras de drenagens em Guarapuava – PR. Dissertação de mestrado em geografia – PPGG- UNICENTRO. Guarapuava, 2014

PICOUET, C., HINGRAY, B., OLIVRY, J.C. (2001). “Empirical and conceptual modeling of the suspended sediment dynamics in a large tropical African river: the Upper Niger river basin.” *Journal of Hydrology*, 250, p.19-39.

RIBEIRO, A.G., As transformações da sociedade e os recursos da natureza na região de Palmas e Guarapuava. **Bol. Geografia** – UEM – Ano 07. n.º1. Maringá, 1989.

REICHARDT, K. A Água em Sistemas Agrícolas. São Paulo: Manole. 1986. 188 p.

ROMERO DÍAZ, A. et al. The causes of piping in a set of abandoned agricultural terraces in southeast Spain. **Catena**, 2007.

ROVIRA, A.; BATALLA, R. J. Temporal distribution of suspended sediment transport in a Mediterranean basin: The Lower Tordera (NE SPAIN). **Geomorphology**, Lleida, V. 79, p. 58–71, 2006.

SANTOS, G.G. GRIEBELER, N.P. DE OLIVEIRA, L.F.C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.14, n.2, p.115–123, 2010.

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. 299311, 2004.

SUGUIO, K.; BIGARELLA, J. J. Ambientes fluviais. 2.ed. Florianópolis: UFSC, 1990. 183 p.

STOTT, T. Impacts of constructing a rural cycle way on suspended sediment transport processes. *Catena*, v.68, p.16 – 24, 2006.

TAYLOR, K. Urban Enviroments. In Perry. C. Taylor, K. (Eds). **Enviromental Sedimentology**. Uk: Blackwee Publishing Ltd. 2007. 441p.

THOMAZ, E.L. Análise empírica da fragilidade potencial da bacia do Rio Iratim, Guarapuava-PR. São Paulo. 188 f. Dissertação (Mestrado em Ciências, área Geografia Física) – Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 2000.

THOMAZ, E. L. VESTENA, L. R. Aspectos Climáticos de Guarapuava-PR. Guarapuava: **UNICENTRO**, 2003.

THOMAZ, E.L., Processos hidrogeomorfológicos e o uso da terra em ambiente subtropical- Guarapuava-PR. 2005. 297f. Tese (Doutorado). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 2005

THOMAZ, E. L. Dinâmica do uso da terra e degradação do solo na bacia do Rio Guabiroba – Guarapuava/PR. Editora UFPR. **R. RA'E GA**, Curitiba, n. 13, p. 109-128, 2007.

THOMAZ, E. L. Avaliação de processos hidro-erosivos em estradas rurais por meio de chuva simulada e análise da eficácia de medidas de controle de sedimento na bacia hidrográfica do Rio das Pedras, Guarapuava-PR. **Relatório de Pesquisa Projeto Fundação Araucária nº 14/2009**.

THOMAZ, E. L. VESTENA, L. R. Avaliação do aporte de sedimento proveniente de estradas rurais e de seus impactos na descarga sólida fluvial em suspensão, na bacia do rio Guabiroba, Guarapuava-PR. **Projeto CNPq- Edital 475161/2007-6, Relatório de Pesquisa 2010**.

THOMAZ, E. L.; ANTONELI, V.; DIAS, W. A. Estimativa de Proveniência de Sedimento em Cabeceira de Drenagem com Alta Densidade de Estradas Rurais não Pavimentadas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 2, p. 25-37, 2011.

THOMAZ, E. L. VESTENA, L. R. RAMOS-SCHARRÓN, C. E. in press. The effects of unpaved roads on suspended sediment concentration of third- to fifth-order streams – A case study from southern Brazil. *WEJ (Hertford) JCR*, v. 28, p. 547-555, 2014.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da Universidade; UFRGS; **Edups**; ABRH, 1993. 943-945p.

VESTENA, L. R., THOMAZ, E. L. Avaliação de conflitos entre áreas de preservação permanente associadas aos cursos fluviais e uso da terra na bacia do rio das pedras, Guarapuava-pr. **Ambiência - Revista do Centro de Ciências Agrárias e Ambientais V. 2 No 1**, 2006 p. 73-85.

VESTENA, L. R. Análise da dinâmica hidrossedimentológica em uma bacia hidrográfica no sul do Brasil. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, p. 414-420, 2009.

VESTENA, L. R. **Análise da relação entre a dinâmica de áreas saturadas e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica por meio de monitoramento e modelagem**. Tese Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2008.

WALLING, D.E. Linking the field to the river: sediment delivery from agricultural land. In: BOARDMAN, J.; FOSTER, I. D. L; DEARING, J. A. Soil erosion on Agricultural Land. Chichester: Wiley, 1990, p. 129-152.

WARD, A. D.; TRIMBLE, S. W. **Environmental hydrology**. 2 ed. New York: Lewis Publishers, 1995. 475p.

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.

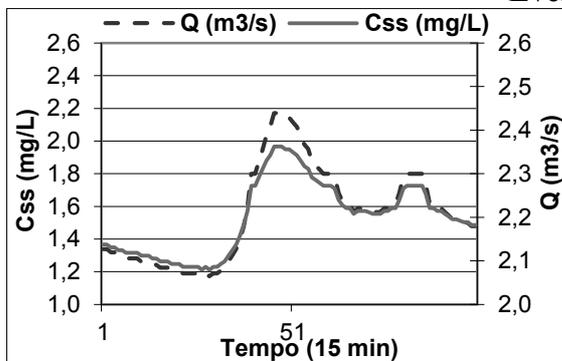
ZABALETA, A.; MARTÍNEZ, M.; URIARTE, J. A.; ANTIGÜEDAD, I. Factors controlling suspended sediment yield during runoff events in small headwater catchments of the Basque Country. **Catena**, v. 71, n. 1, p. 179-190, 2007.

ZACHAR, D. Soil erosion: Developments in soil science. New York: Elsevier Scientific, 1982. 547p.

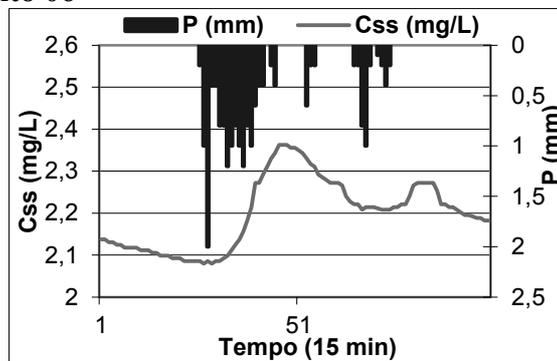
## APÊNDICES

## APÊNDICE A - HISTERESE SINGLE – VALUED LINE

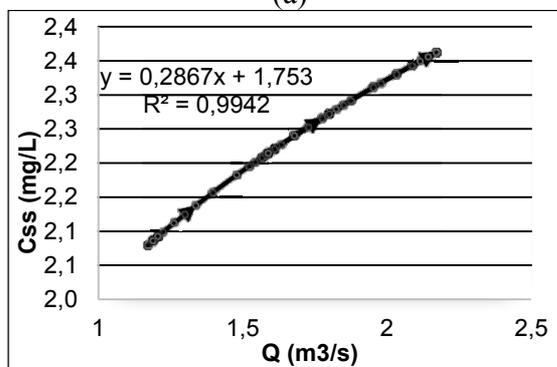
## Evento 06



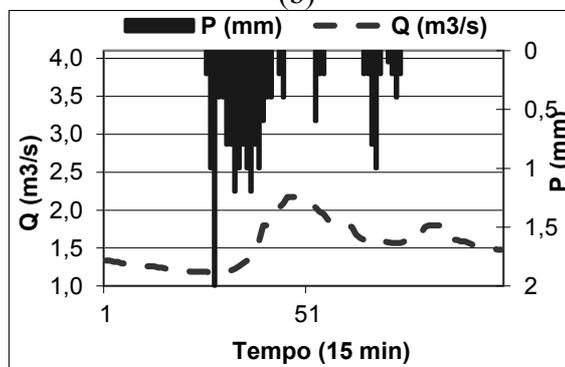
(a)



(b)



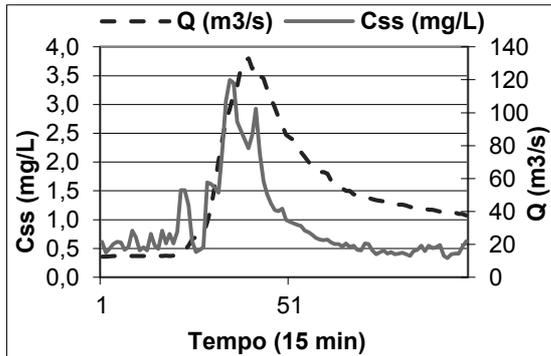
(c)



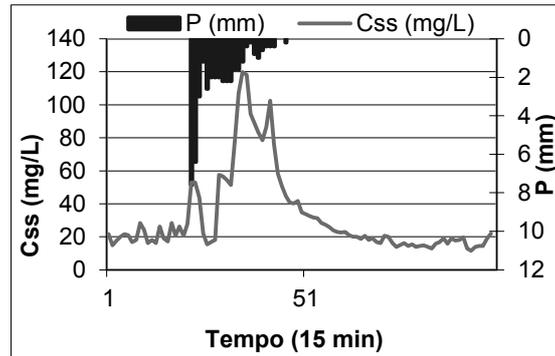
(d)

## APÊNDICE B - HISTERESE CLOCKWISE LOOP

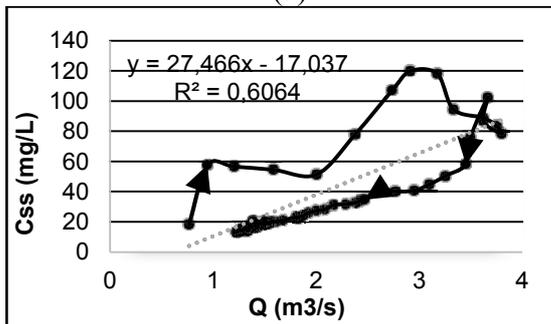
### Evento 04



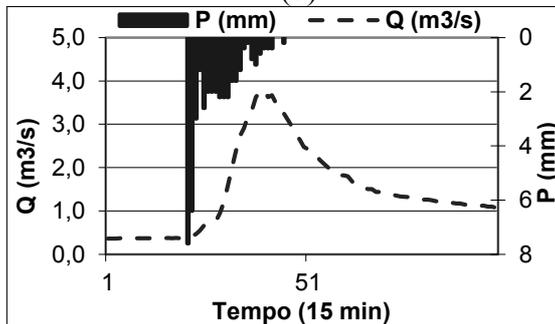
(a)



(b)

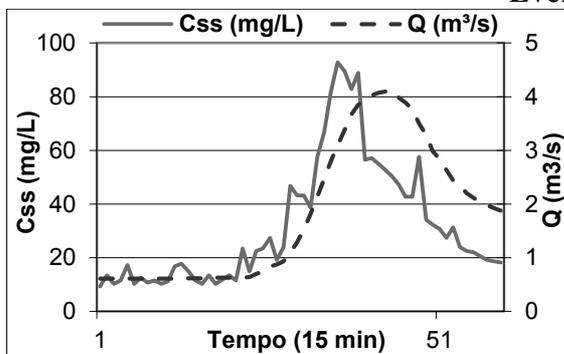


(c)

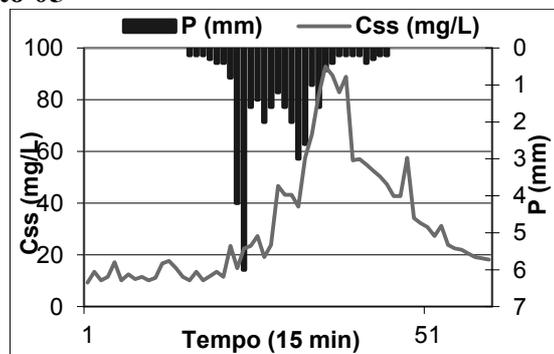


(d)

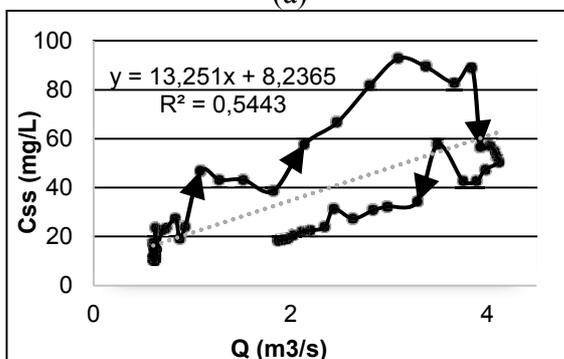
### Evento 05



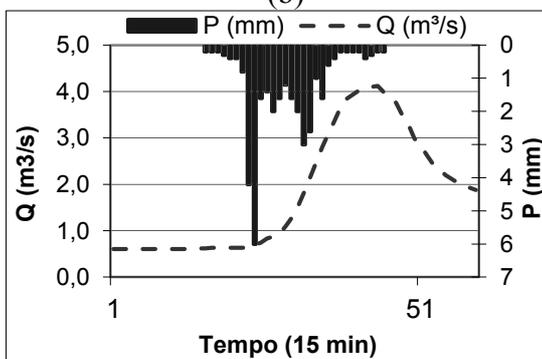
(a)



(b)

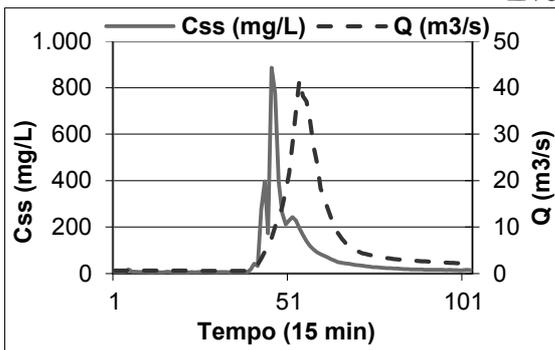


(c)

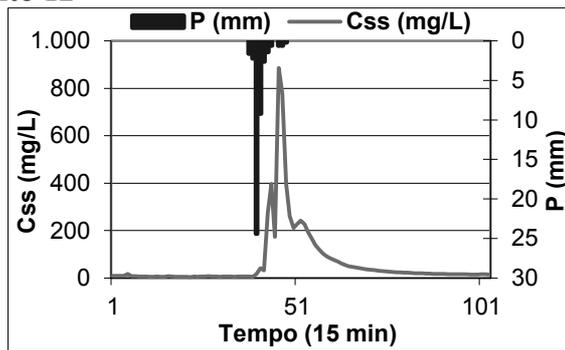


(d)

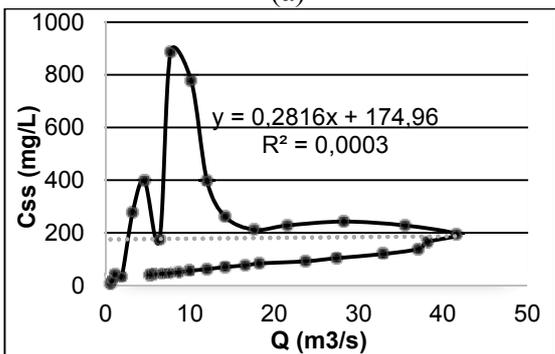
**Evento 12**



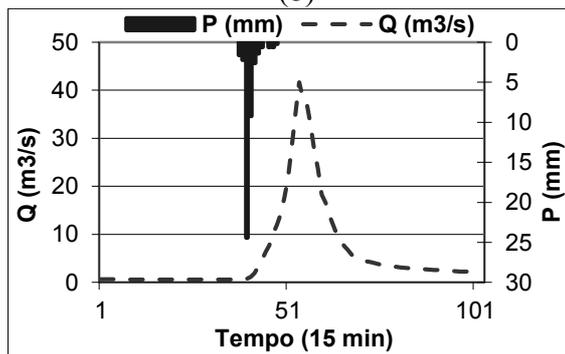
(a)



(b)

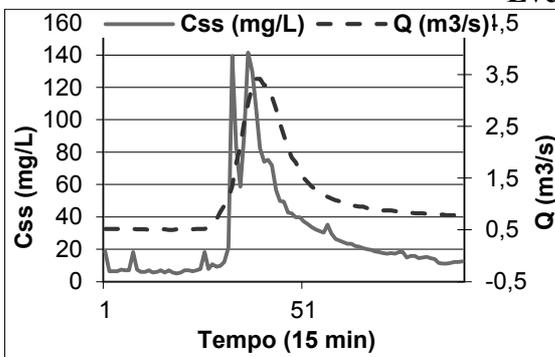


(c)

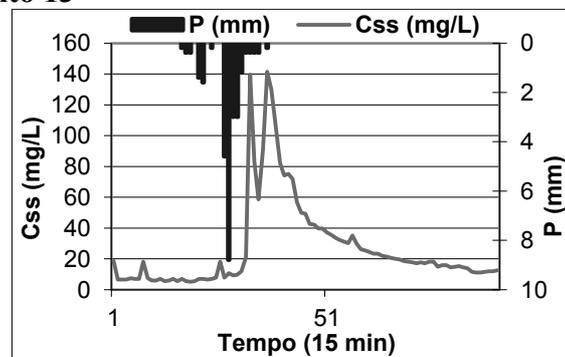


(d)

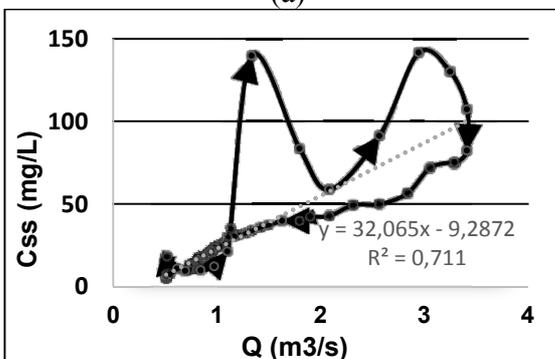
**Evento 13**



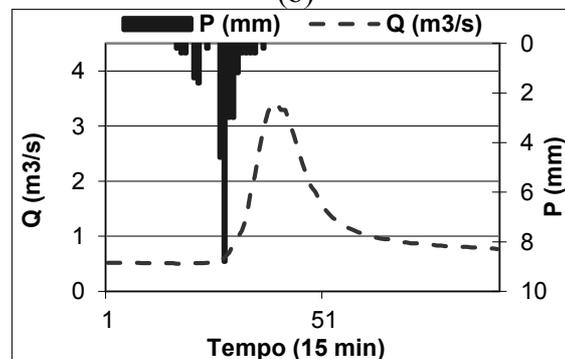
(a)



(b)

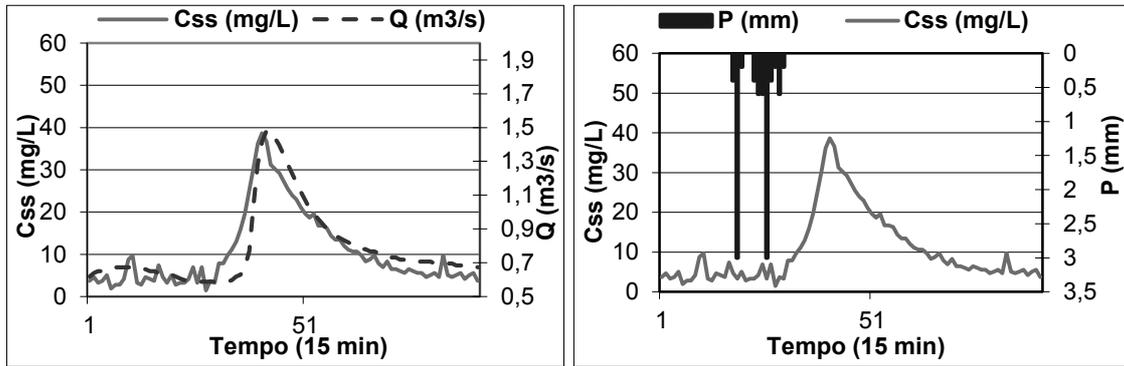


(c)



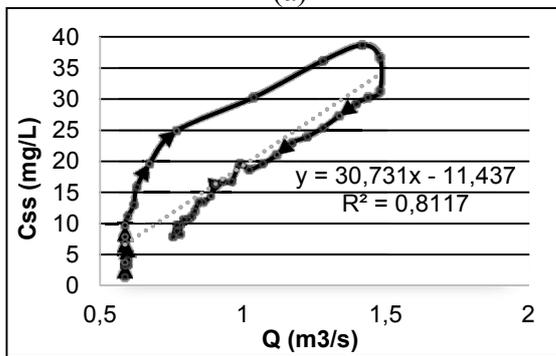
(d)

**Evento 14**

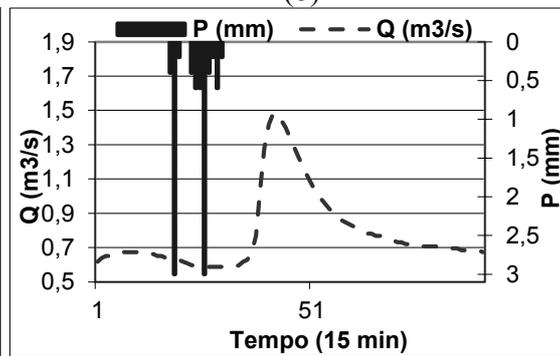


(a)

(b)

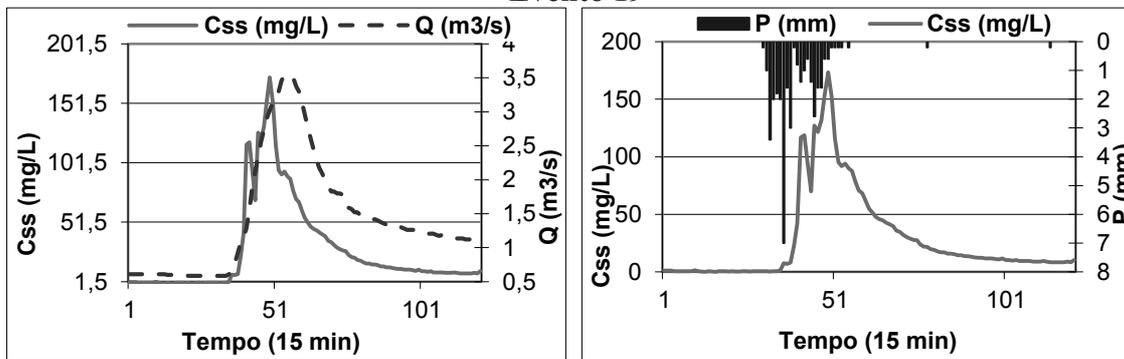


(c)



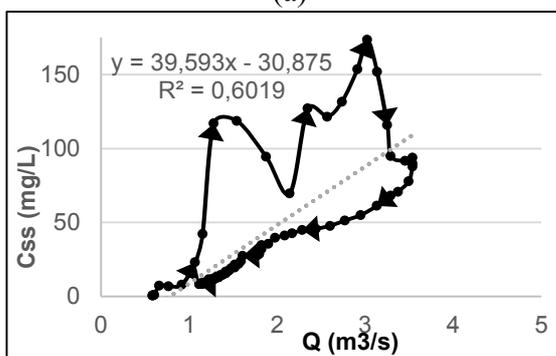
(d)

**Evento 19**

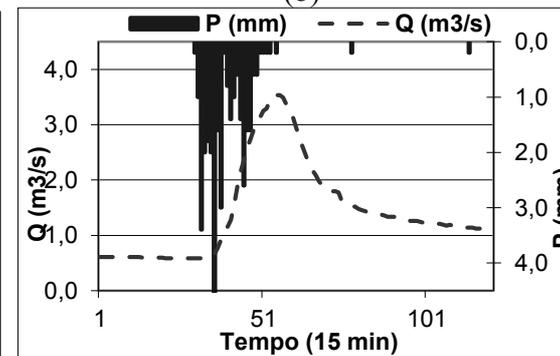


(a)

(b)



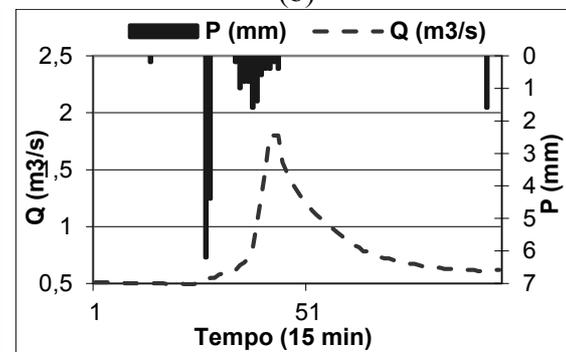
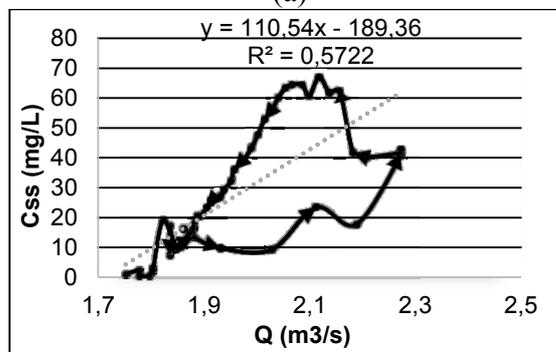
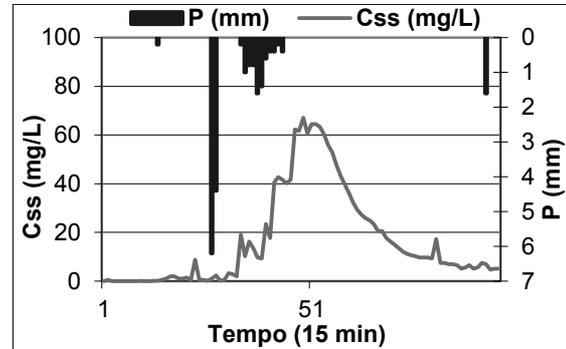
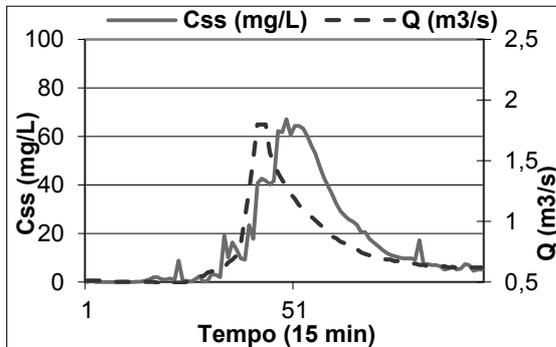
(c)



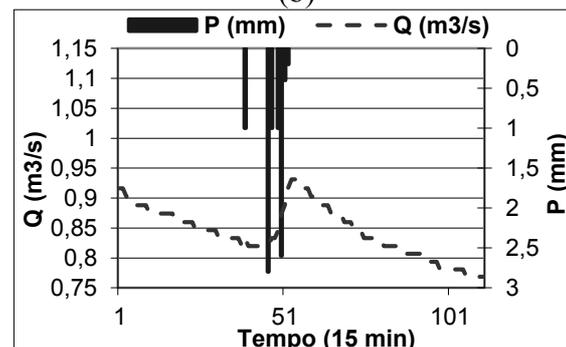
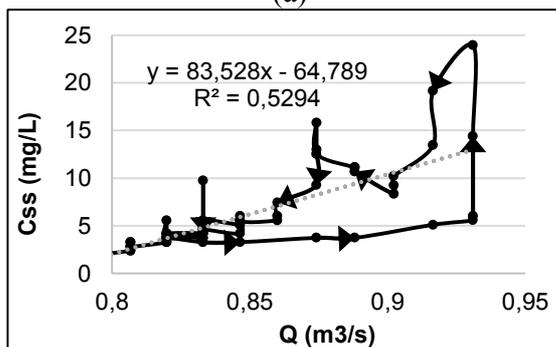
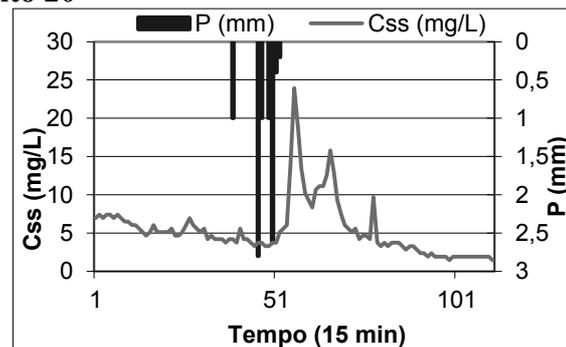
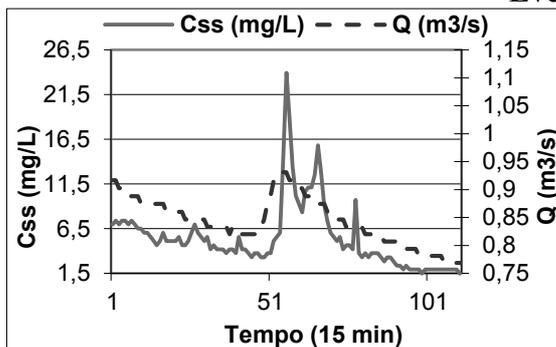
(d)

## APÊNDICE C - HISTERESE COUNTERCLOCK WISE LOOP

### Evento 11

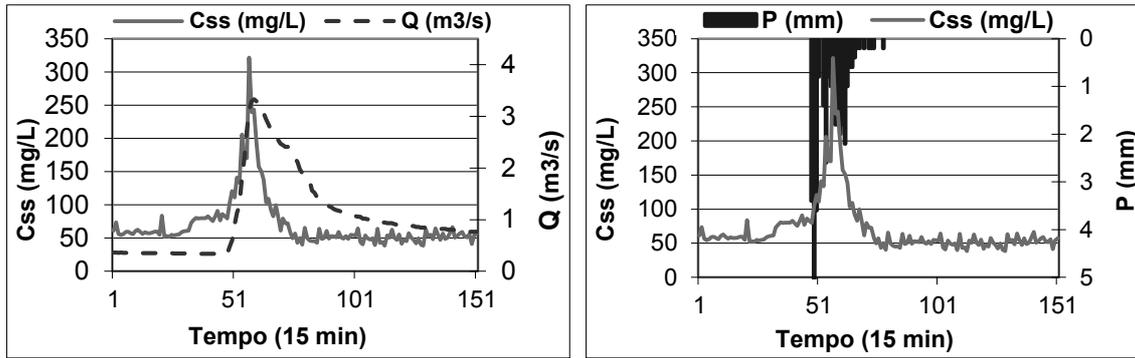


### Evento 20



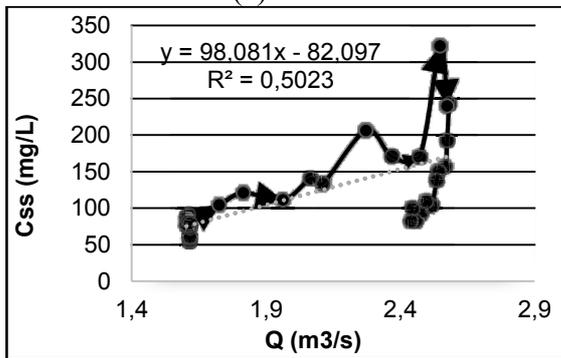
APÊNDICE D - HISTERESE *SINGLE LINE PLUS LOOP*

Evento 9

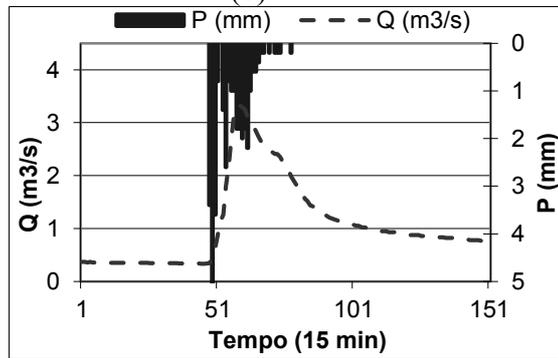


(a)

(b)

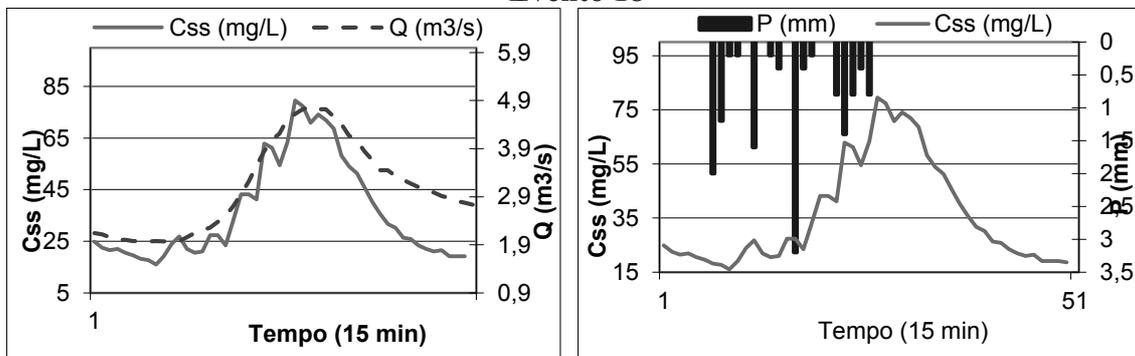


(c)



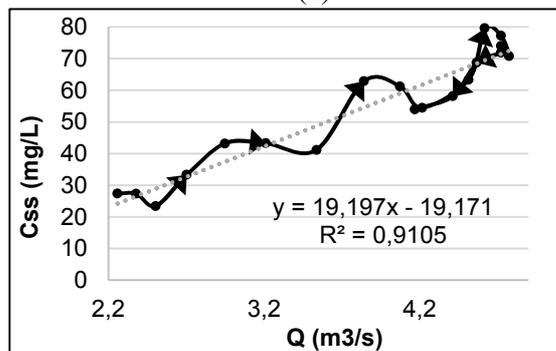
(d)

Evento 18

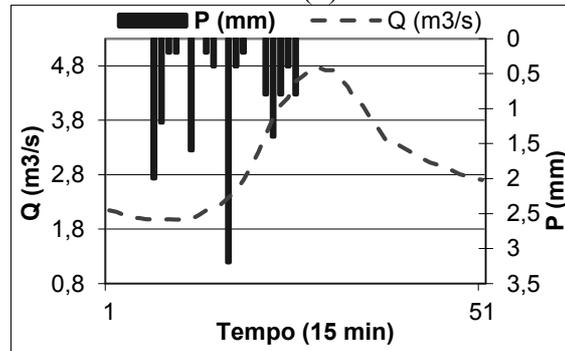


(a)

(b)



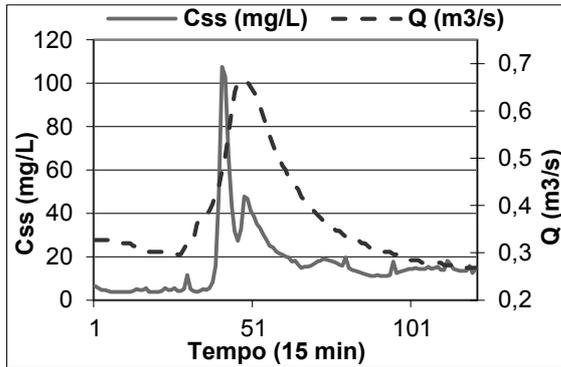
(c)



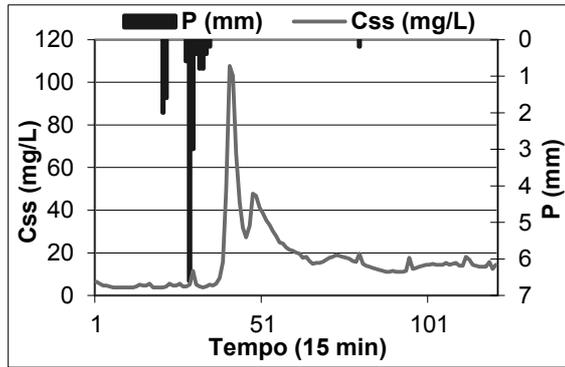
(d)

APÊNDICE E - HISTERESE *FIGURE EIGHT*

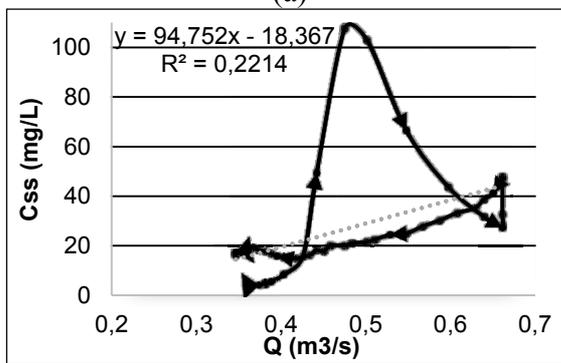
Evento 01



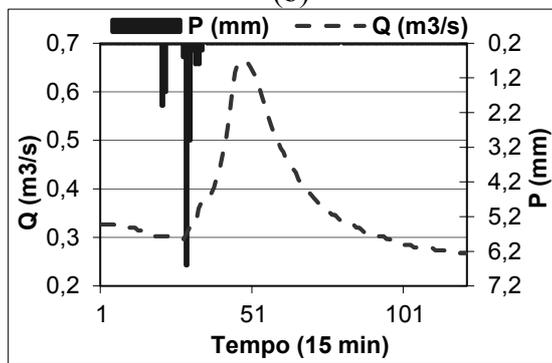
(a)



(b)

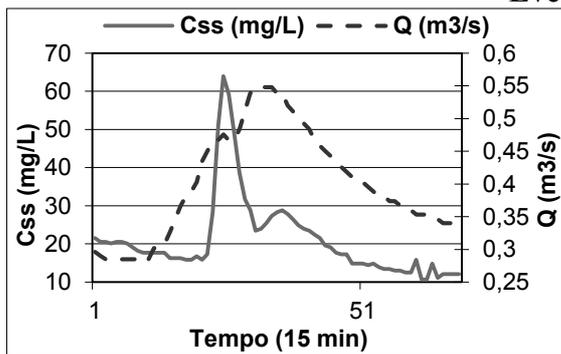


(c)

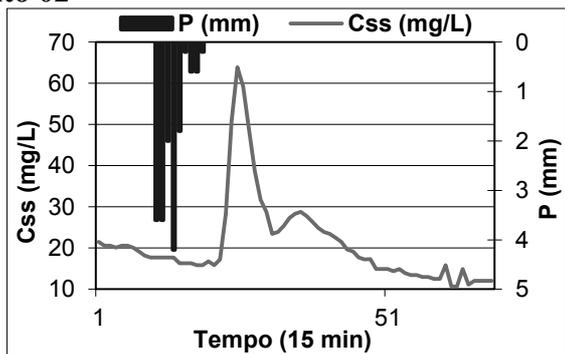


(d)

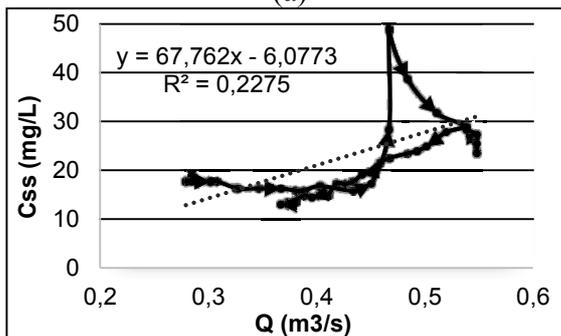
Evento 02



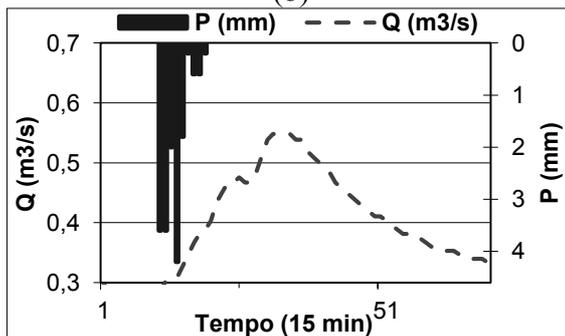
(a)



(b)

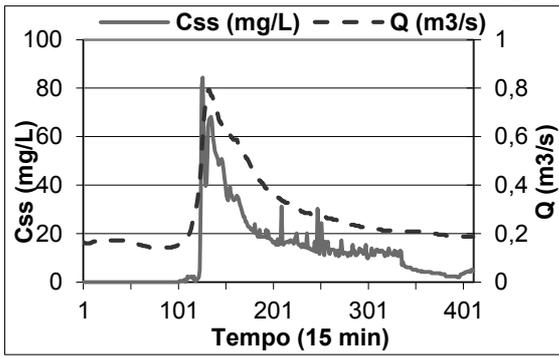


(c)

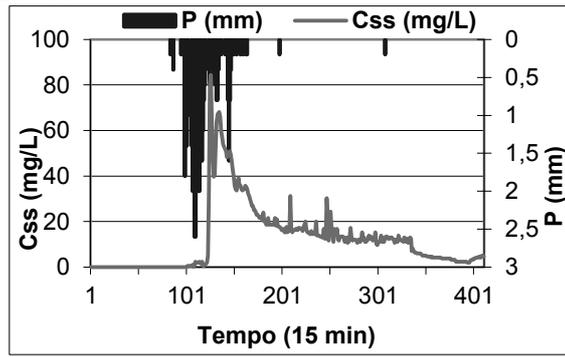


(d)

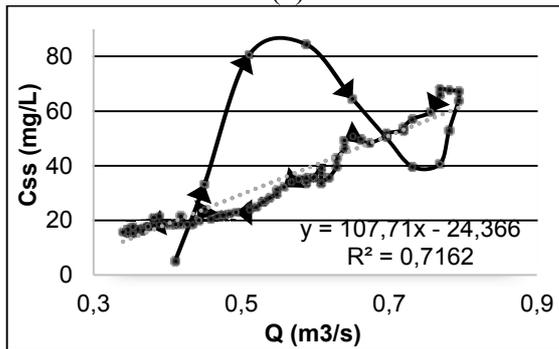
**Evento 03**



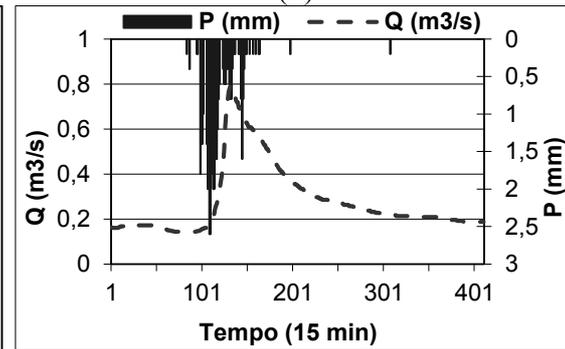
(a)



(b)

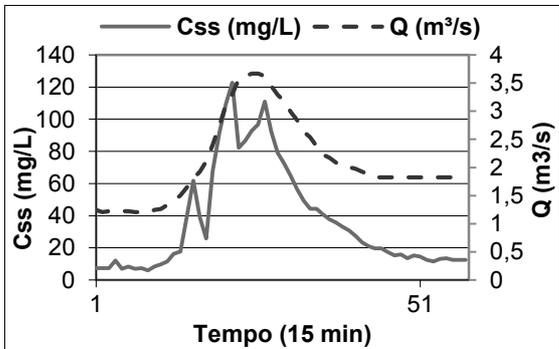


(c)

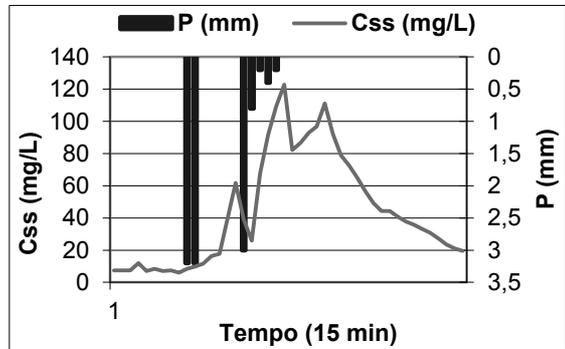


(d)

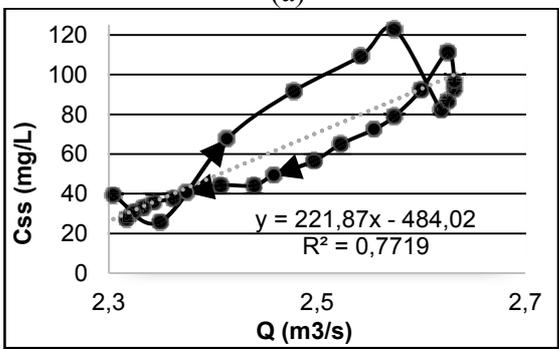
**Evento 07**



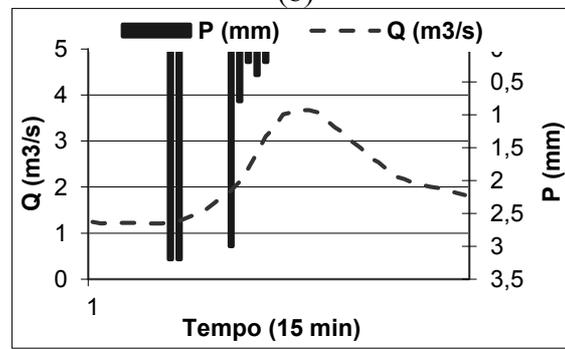
(a)



(b)

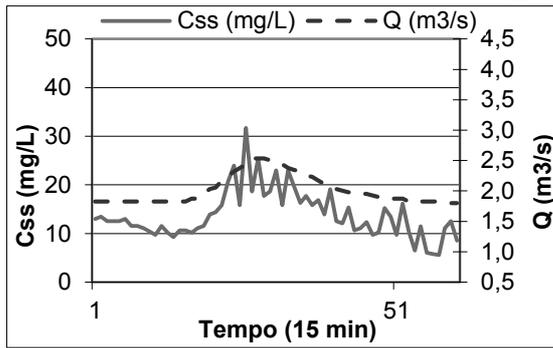


(c)

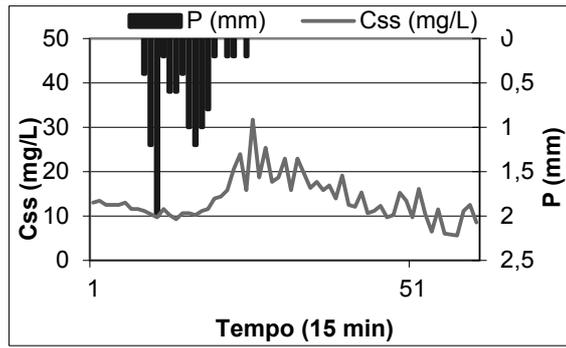


(d)

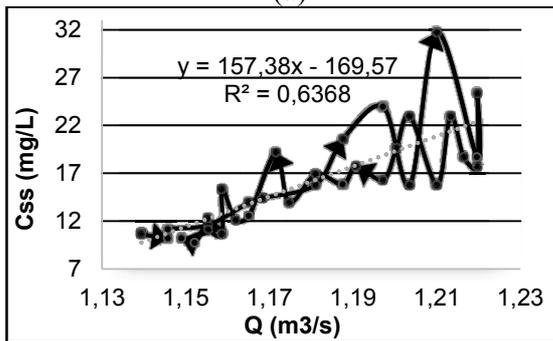
**Evento 08**



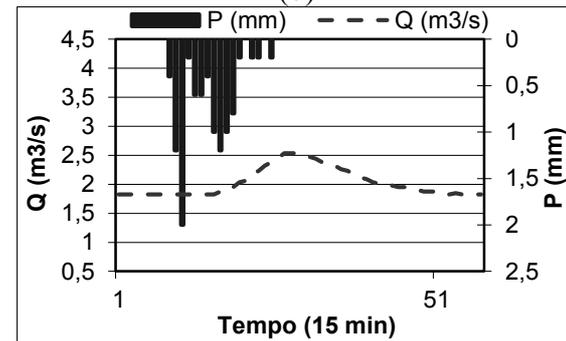
(a)



(b)

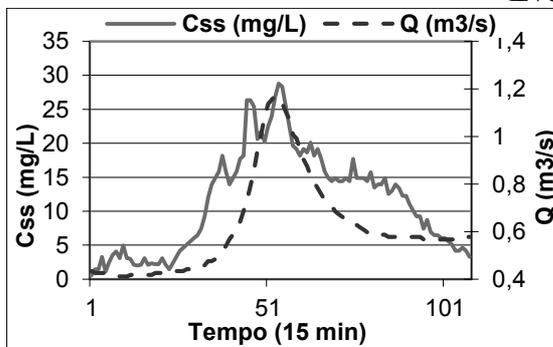


(c)

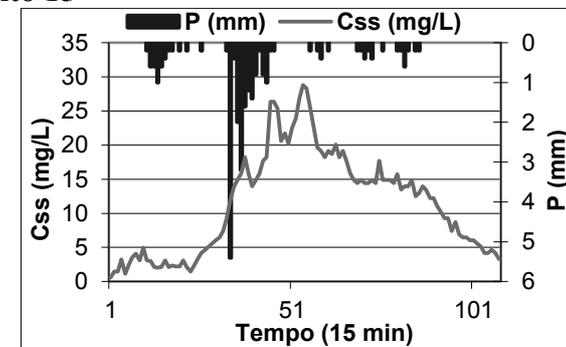


(d)

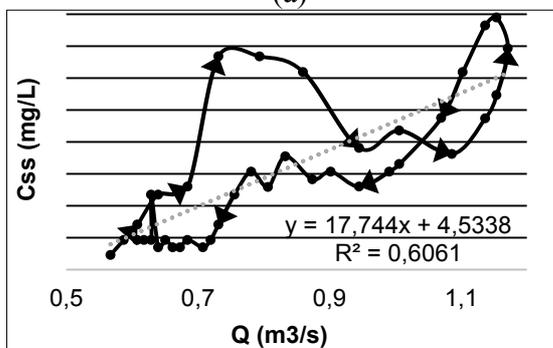
**Evento 15**



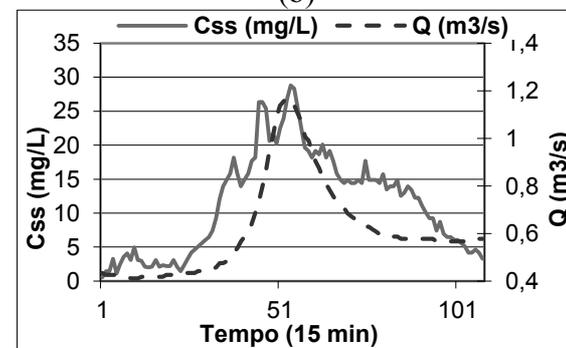
(a)



(b)

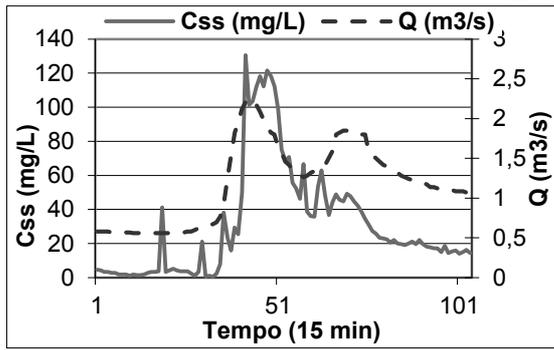


(c)

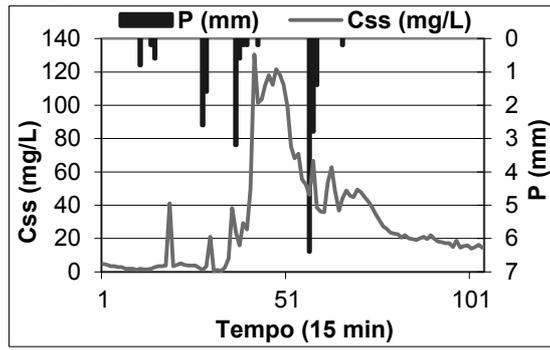


(d)

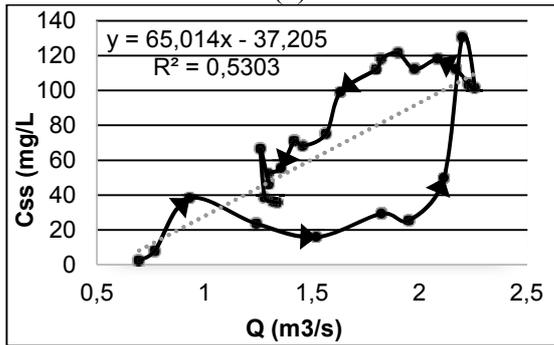
**Evento 16**



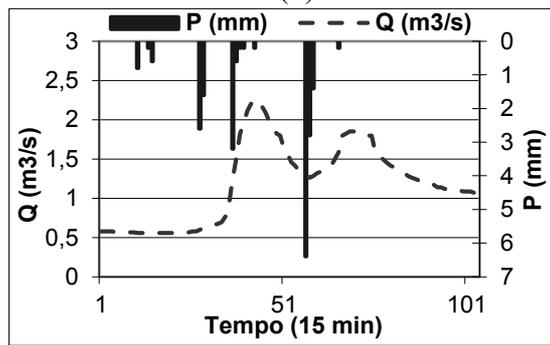
(a)



(b)

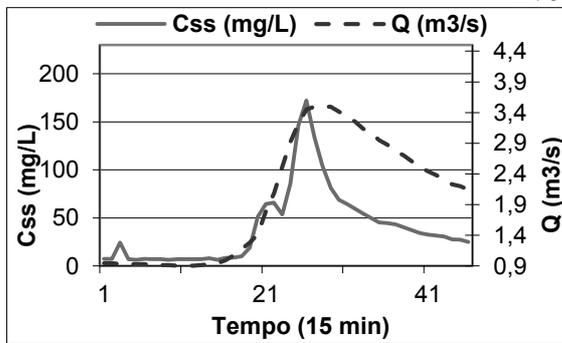


(c)

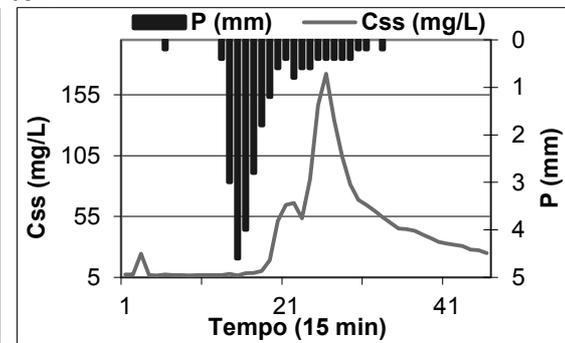


(d)

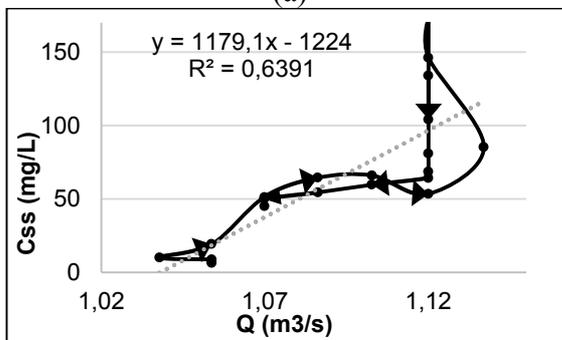
**Evento 17**



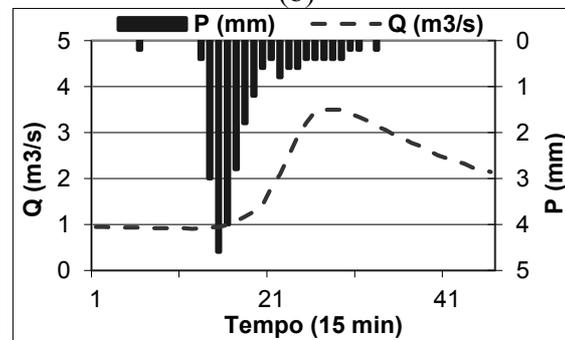
(a)



(b)



(c)



(d)