

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Dissertação

**Monitoramento hidrossedimentológico numa bacia hidrográfica do Escudo
Sul-Rio-Grandense**

Guilherme Kruger Bartels

Pelotas, 2015

Guilherme Kruger Bartels

**Monitoramento hidrossedimentológico numa bacia hidrográfica do Escudo
Sul-Rio-Grandense**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares - UFPel

Pelotas, 2015

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

B283m Bartels, Guilherme Kruger

Monitoramento hidrossedimentológico numa bacia hidrográfica do escudo sul-rio-grandense / Guilherme Kruger Bartels ; Gilberto Loguercio Collares, orientador. — Pelotas, 2015.

87 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2015.

1. Produção de sedimentos. 2. Transporte em arraste. 3. Monitoramento. 4. Histerese. I. Collares, Gilberto Loguercio, orient. II. Título.

CDD : 627

Guilherme Kruger Bartels

**Monitoramento hidrossedimentológico numa bacia hidrográfica do Escudo
Sul-Rio-Grandense**

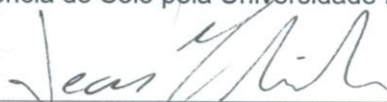
Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 30/04/2015

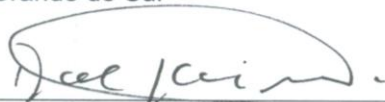
Banca examinadora:



Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares (Orientador)
Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria



Prof. Dr. Jean Paolo Gomes Minella
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul



Prof. Dr. Dalvan José Reinert
PhD em Crops and Soil Science pela Michigan State University



Profª. Dr. Viviane Santos Silva Terra
Doutora em Agronomia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais Jorge e Rute e minha irmã Janaina, pelo grande incentivo em toda a jornada acadêmica e minha namorada Isabela pelo apoio e compreensão.

Agradecimento

Agradeço a minha família pelo apoio e acompanhamento na minha trajetória.

A Universidade Federal de Pelotas pelo ensino, desde o ensino técnico (CAVG), graduação (FAEM) e em especial ao curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos.

A CAPES pela concessão de bolsa de estudo.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares, pela oportunidade concedida, orientação, amizade, confiança e incentivo.

Ao técnico em hidrologia Reginaldo Galski Bonczynski, pela amizade e apoio nas inúmeras saídas de campo para os trabalhos na bacia.

Ao Prof. Dr. Luis Eduardo Suzuki, pelo apoio nas atividades no Laboratório de Solos e Hidrossedimentologia.

Aos meus colegas da 1^o turma do mestrado em Recursos Hídricos, Bernardo, Caroline, Fernanda, Gabriela e Mariana, pelos momentos vivenciados.

Aos colegas do grupo de Hidrometria e Hidrossedimentologia, Viviane e Roberta, pela amizade, ajuda, e discussão dos trabalhos.

Aos alunos de graduação e bolsistas de iniciação científica na qual tiveram ou tem passagem pelo grupo de Hidrometria e Hidrossedimentologia, pela ajuda indispensável nas atividades desempenhadas em campo e laboratório. Em especial: Alessandro, Felício, Felipe, Fernando, George, Guilherme, Henrique, Izadora, Janice e Luciana.

A minha namorada Isabela, pela compreensão durante estes dois anos de mestrado.

Aos produtores na qual concederam as áreas para instalação as estações de monitoramento na bacia.

A todos, aqui citados ou não, que contribuíram de alguma forma, direta ou indiretamente, para realização deste trabalho.

Resumo

BARTELS, G.K. Monitoramento hidrossedimentológico numa bacia hidrográfica do Escudo Sul-Rio-Grandense. 2015, 87p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS, 2015.

A construção e uso de redes de monitoramento hidrossedimentológicas, são extremamente importantes para compreensão da dinâmica dos fenômenos envolvidos, chuva, vazão e produção de sedimentos. O monitoramento hidrossedimentológico realizado para descrever e compreender o transporte e a produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica. Assim o objetivo deste trabalho foi analisar relações entre os processos hidrossedimentológicos numa bacia hidrográfica rural, utilizando técnicas de monitoramento. O trabalho foi realizado na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro, localizada entre os municípios de Pelotas e Morro Redondo/RS, com área de 17,17km², elevação média de 194 metros, predominância de relevo ondulado. Os usos predominantes do solo são das atividades desenvolvidas em pequenas propriedades familiares, observando-se o cultivo de espécies como pêssego, milho e tabaco, além de atividades de pecuária leiteira e avicultura. O monitoramento hidrossedimentológico contínuo teve início em 2014, com sensores de precipitação (pluviógrafos), sensor de pressão (nível) e sensor de turbidez (turbidímetro). Durante o período de monitoramento de 6 meses (abril a outubro de 2014) foram monitorados 13 eventos de precipitação, com diferentes características e em diferentes condições de uso e manejo do solo. Os resultados demonstram que a produção de sedimento tem relação direta com a magnitude dos eventos de precipitação, na qual um evento extremo foi responsável pelo transporte de 1.335,58 toneladas de sedimento, correspondendo a 59,4% da produção total de sedimentos de todos os eventos monitorados. O sedimento transportado em arraste representou de 9 a 43,8% do total de sedimento transportado, destacando sua importância do transporte em arraste no Arroio do Ouro. O laço de histerese não apresentou predominância em um único sentido, observando-se eventos com sentido horário e anti-horário. No entanto os eventos que apresentaram histerese anti-horária foram caracterizados por serem de pequena magnitude, nestes eventos é possível que ocorra a deposição de sedimento na calha fluvial, limitados ao transporte de sedimento proveniente de áreas mais distantes como é o característico deste tipo de histerese.

Palavras-Chave: produção de sedimentos; transporte em arraste; monitoramento; histerese

Abstract

BARTELS, G.K. **Hydrosedimentological monitoring in catchment from Sul-Rio-Grandense shield**. 2015. 87p, Dissertation, (Master in Water Resources), Federal University of Pelotas-RS, 2015.

The construction and the use of hydrosedimentological monitoring networks, are extremely important for the comprehension of the dynamics of phenomena involved, e.g. rain, discharge and sediment production. The hydrosedimentological monitoring is realized to describe and understand the transport and production of sediment in one catchment. Therefore the objective of this work was to analyze the relationship between the hydrosedimentological processes in one rural catchment, using monitoring techniques. This work was developed in the Arroio do Ouro catchment, situated between Pelotas and Morro Redondo/RS, with a drainage area of 17,27km², with average elevation of 194 meters, and undulating relief predominant. The soil uses are destined to activities in small farms, observing the cultivate of peach, corn and tobacco, apart from activities of livestock milk and aviculture. The continuous hydrosedimentological monitoring began in the beginning of 2014, with precipitation sensors (rain gauges), pressure sensors (pressure-sensing limnograph), and turbidity sensors (turbidity meter). During the 6-month monitoring period (April to October, 2014) 13 precipitation events were monitored, with different features and different condition of use and management. The results demonstrate that the sediment production has a direct relation with the magnitude of the precipitation events, in which one of these events was responsible for the transport of 1335,58 tons of sediment, corresponding to 59,4% of the total production of sediments of the all monitoring events. The bedload transported represented from 9 to 43,8% of the total of sediment rate, highlighting the importance of the total bedload in Arroio do Ouro. The hysteretic loops did not produce predominance of one type of way, presenting clockwise and counter-clockwise events. However, the events which presented counter-clockwise hysteretic loops were characterized by the lower magnitude. In these events it is possible the occurrence of sediment deposition in the river channel, limited to transport of sediment from more distant areas, as it is typical in this type of hysteretic loops.

Key-words: sediments production; bedload transport; monitoring; hysteretic loops.

Lista de Figuras

Figura 1 – Localização da Bacia Hidrográfica do Arroio do Ouro entre os municípios de Pelotas e Morro Redondo-RS.	28
Figura 2 – Modelo digital de elevação (MDE) e mapa de declividade da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.	31
Figura 3 – Uso do solo na Bacia Hidrográfica do Arroio do Ouro.....	33
Figura 4 – Estrutura construída para realizar as medições de vazão, concentração de sedimentos em suspensão e sedimento transportado em arraste (a) e detalhe da instalação do guincho hidrométrico (b) na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.	34
Figura 5 – Localização dos pluviógrafos no interior da bacia e a área representativa de cada pluviógrafo.	36
Figura 6 – Imagens representativas do pluviógrafo EH-HS03 (a, b) e dos pluviógrafos E-01, E-02 e E-03 (c) na Bacia Hidrográfica do Arroio do Ouro.	37
Figura 7 – Molinete OTT C31 na Bacia do Arroio do Ouro.....	38
Figura 8 – Curva-chave de vazão para a bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	40
Figura 9 – Amostrador de sedimentos em suspensão do tipo USDH-59 (a) e amostra acondicionada na garrafa (b).....	42
Figura 10 – Sensor de turbidez e sensor de nível.	44
Figura 11 – Calibração do sensor de turbidez com solução de formazina.	45
Figura 12 – Amostrador Helley-Smith, utilizado para amostragem de sedimento transportado em arraste.	47
Figura 13 – Hietograma, hidrograma e sedimentograma dos eventos ocorridos nos dias: 03/05/2014 (a), 13/06/14 (b), 29/06/14 (c) e 04/07/2014 (d), para a bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.	65
Figura 14 – Hietograma, hidrograma e sedimentograma dos eventos ocorridos nos dias: 06/07/2014 (a), 17/07/14 (b), 22/07/14 (c) e 30/07/2014 (d), para a bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.	66

Figura 15 – Hietograma, hidrograma e sedimentograma dos eventos ocorridos nos dias: 02/08/2014 (a), 03/08/14 (b), 11/08/14 (c) e 06/09/2014, para a bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	67
Figura 16 – Hietograma, hidrograma e sedimentograma do evento ocorrido no dia 10/09/2014, para a bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	68
Figura 17 – Curvas de histerese no sentido horário (a, c, d, e, f, g), no forma de oito (b) e anti-horário (h), para os eventos ocorridos na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.	72
Figura 18 – Curvas de histerese no sentido anti-horário (a, b, c, d) e horário (e), para os eventos ocorridos na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	73
Figura 19 – Curva de regressão entre a turbidez e a C_{ss}	75
Figura 20 – Curva de regressão entre vazão e a descarga de arraste.	77
Figura 21 – Relação entre as variáveis hidrológicas: Escoamento superficial (a), vazão máxima (b) e o produto destas duas (c) e a produção total de sedimentos (PS), para os eventos ocorridos na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	80

Lista de Tabelas

Tabela 1– Caracterização morfológica da Bacia Hidrográfica do Arroio do Ouro.	29
Tabela 2 – Distribuição das classes de declividade e as formas do relevo da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.	31
Tabela 3 – Distribuição da área de ocupação e da porcentagem de cada uso do solo da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.	33
Tabela 4 – Dados médio, quinzenais, da precipitação total, vazão e concentração de sedimento em suspensão para o período do monitoramento na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.	52
Tabela 5 – Variáveis hidrossedimentológicas dos 13 eventos monitorados no período de 16/04/14 a 15/10/14 na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.	60
Tabela 6 – Variáveis hidrossedimentológicas e índice de histerese para os eventos monitorados na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.	74

Sumário

1 Introdução.....	12
1.1 Objetivos.....	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos.....	14
1.2 Hipótese	14
2 Revisão de literatura	16
2.1 Caracterização morfológica	16
2.2 Processo erosivo	18
2.3 Monitoramento Hidrossedimentológico.....	20
3 Material e Métodos	27
3.1 Localização da área experimental	27
3.2 Caracterização da bacia hidrográfica.....	28
3.3 Monitoramento hidrossedimentológico	33
3.3.1 Monitoramento da precipitação	35
3.3.2 Monitoramento da descarga líquida	37
3.3.3 Monitoramento da descarga sólida	41
3.3.3.1 Concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}).....	41
3.3.3.2 Sedimento transportado em arraste	46
3.4 Análise do comportamento hidrossedimentológico	48
4 Resultados e discussão.....	51
4.1 Monitoramento hidrossedimentológico	51
4.1.1 Monitoramento das variáveis hidrossedimentológicas em escala quinzenal	51
4.1.2 Análise na escala de eventos	54

4.1.2.1 Efeito da histerese entre a C_{ss} e a vazão	68
4.1.3 Relação entre a C_{ss} e a Turbidez	75
4.1.4 Relação entre a vazão e a descarga em arraste	76
4.1.5 Relação entre a produção de sedimentos e variáveis hidrológicas	78
5 Conclusão	77
Referências	78

1 Introdução

A utilização do solo de maneira equivocada, principalmente quando este é utilizado além de sua capacidade de suporte, pode trazer sérios danos às suas propriedades. A degradação do solo, além de causar prejuízos como a compactação da camada arável, redução da fertilidade, potencialmente reduz áreas possíveis de utilização agrícola e causa sérios impactos ambientais, econômicos e sociais.

A erosão é uma das principais formas de degradação do solo. Em solos que não possuem cobertura vegetal o impacto da gota da chuva causa o desprendimento das partículas, e estas, através do escoamento superficial, são carregadas e depositadas nas áreas mais baixas do terreno e nos cursos d'água. O processo erosivo intensifica-se com o manejo inadequado do solo especialmente em áreas com alta declividade, acelerando o escoamento e conseqüentemente a produção e o transporte de sedimento para o curso d'água. A variação da produção de sedimento está intimamente associada com o uso e manejo dos solos, bem como com a geomorfologia do local, sendo o monitoramento contínuo da produção de sedimentos, durante e após eventos de precipitação, de extrema importância para caracterização hidrossedimentológica de uma bacia hidrográfica.

O estudo do comportamento hidrossedimentológico é crucial para um adequado diagnóstico e gestão de bacias hidrográficas, principalmente quando se verifica emprego para agricultura e abastecimento público. Na zona rural a degradação do solo, muitas vezes obriga que os agricultores reduzam suas áreas de exploração agropecuária, intensificando a utilização de fertilizantes e agrotóxicos, para conseguir manter a produção em espaços cada vez menores da área de cultivo, aumentando os custos de produção. Isto pode acarretar em um aumento do potencial de poluição dos corpos hídricos, sendo que partículas são carregadas, juntas com o sedimento, até os cursos d'água.

Quando o curso d'água possui potencial de uso para irrigação ou o abastecimento público, o sedimento transportado e depositado no leito pode inviabilizar a construção de obras hidráulicas tais como barragens, principalmente se a bacia hidrográfica apresentar uma considerável descarga de sedimento transportado em arraste. A construção de uma barragem causa o amortecimento da

velocidade de escoamento da água, reduzindo a energia necessária para o transporte, permanecendo o sedimento depositado no reservatório. O sedimento além de reduzir o volume útil dos reservatórios, influencia na qualidade da água para abastecimento público e ainda os nutrientes carregados juntos com o sedimento podem causar a eutrofização do ambiente, elevando os custos de tratamento para tornar a água potável.

A bacia hidrográfica do Arroio do Ouro, base geográfica desse estudo, está inserida entre os municípios de Morro Redondo e Pelotas, na região Sul do Estado do Rio Grande do Sul, localizada na província geomorfológica do Escudo Sul-Rio-Grandense. Esta bacia é representativa da porção com maior altitude da bacia hidrográfica do Arroio Pelotas tanto pelas suas características de relevo, uso e ocupação do solo como pelas atividades desenvolvidas, podendo ser referência na caracterização dos processos que originam perda de solo e a produção de sedimentos na região. A bacia hidrográfica do Arroio Pelotas é a maior bacia do município de Pelotas, sendo a principal fonte de captação de água para o abastecimento público do município, através da estação de tratamento de água Sinnott. Neste sentido, o estudo hidrossedimentológico na bacia do Arroio do Ouro permite que, as informações pertinentes à bacia possam ser utilizadas pelos gestores na tomada de decisões necessárias para projetos que envolvam a dinâmica sedimentológica.

A bacia do Arroio do Ouro é ocupada principalmente por agricultores familiares, retirando sua renda, na maioria das vezes, de atividades desenvolvidas em pequenas áreas. Estas atividades, muitas vezes realizadas de maneira inadequada, empregando métodos convencionais de preparo do solo que, aliadas as propriedades e características de solos, declivosos e rasos, pouco estruturados, favorecem a erosão provocada pelo escoamento superficial e, como consequência elevada produção de sedimentos.

Neste contexto, o uso de redes de monitoramento hidrossedimentológicas, são importantes para compreensão da dinâmica dos fenômenos envolvidos, chuva, vazão e produção de sedimentos. Neste trabalho o monitoramento hidrossedimentológico foi realizado para descrever e compreender o transporte e a produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar os processos hidrossedimentológicos utilizando as relações numa bacia hidrográfica rural.

1.1.2 Objetivos específicos

- Compor um banco de dados para a bacia hidrográfica com variáveis fisiográficas e séries temporais que represente os processos hidrossedimentológicos.
- Descrever as relações entre o transporte de sedimentos em arraste e vazão durante os eventos de precipitação.
- Analisar a transferência de sedimentos e a descarga líquida durante os principais eventos.
- Relacionar a produção de sedimento dos eventos com as principais variáveis hidrológicas monitoradas.

1.2 Hipótese

A quantificação da descarga de sedimento de arraste no Arroio do Ouro significa uma parcela expressiva na produção total, configurando elemento importante para o entendimento de processos desta natureza, na escala de bacias hidrográficas.

2 Revisão de literatura

2.1 Caracterização morfológica

A bacia hidrográfica pode ser compreendida como uma área delimitada por um divisor de águas no qual o escoamento resultante de uma precipitação no seu interior converge para um ponto de menor cota, denominado de exutório, podendo se configurar numa seção de controle de processos que envolvam chuva e vazão. As características morfológicas de uma bacia hidrográfica repercutem em todo o fluxo superficial de água, sendo esta utilizada como unidade geomorfológica fundamental (PISSARRA et al., 2004). Deste modo, vários autores descrevem a utilização da Bacia Hidrográfica como unidade territorial para o desenvolvimento de atividades ligadas ao planejamento e gestão de recursos hídricos (TEODORO et al., 2007; TONELLO, 2005; YASSUDA, 1993), sendo de extrema relevância a caracterização morfológica da bacia em estudos ambientais.

Conforme descrito por Lima (1986) o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas é variável de uma para outra, sendo função das características morfológicas como: área, forma, topografia, geologia, solos e cobertura vegetal. Assim, estas características afetam, em uma bacia hidrográfica, diretamente a infiltração, produção de escoamento, evapotranspiração, armazenamento de água no solo, entre outros (TONELLO et al., 2006), além de que qualquer interação destes componentes ou ações antrópicas são perceptíveis na seção de controle da bacia (BARROS, 2012).

Segundo Lima (1986) os parâmetros característicos de uma bacia hidrográfica podem ser classificados em: físicos, geológicos, de vegetação e de inter-relações. As características físicas apresentam extrema importância no comportamento hidrológico, pois, é possível estabelecer relações entre estas e dados hidrológicos (VILLELA; MATOS, 1975). Estas ainda possuem extrema relevância na indicação da possibilidade de ocorrência de enchentes, inundações, entre outros (ANGILLIERI, 2008; VILLELA; MATOS, 1975).

Bertossi et al. (2011) ao caracterizar a sub-bacia do córrego Horizonte por meio de Sistema de Informações Geográficas (SIG) ressaltaram que esta ferramenta pode auxiliar a gestão e o gerenciamento do recursos hídricos. O SIG realiza a interpolação de informações do relevo como, curvas de nível e pontos cotados, para a construção da distribuição espacial da superfície e da altitude do terreno, assim denominado de Modelo Digital de Elevação (MDE) (OLIVEIRA et al., 2010). Este MDE derivado do SIG apresenta como principais vantagens a velocidade de processamento, repetibilidade, integração de bancos de dados e a subjetividade da intervenção manual (VALERIANO et al., 2006). O SIG representa as características da bacia, dividindo esta em uma malha de células com diversas resoluções.

Quanto às características geológicas, estas podem ser utilizadas como base para o entendimento das dinâmicas naturais e antrópicas (ROSS, 1994). A bacia hidrográfica do Arroio do Ouro está inserida na bacia hidrográfica do Arroio Pelotas na região do Escudo Sul-Rio-Grandense. A bacia do Arroio Pelotas compreende duas províncias geomorfológicas, nas regiões com maior altitude encontra-se o Escudo Sul-Rio-Grandense e, conforme se aproxima do litoral, reduz a elevação e a declividade, situando-se na Planície Costeira.

Megiato (2011) realizou um estudo de fragilidade ambiental da bacia do Arroio Pelotas, atribuindo à região do Escudo Sul-Rio-Grandense, associação ao processo erosivo e na Planície Costeira ao processo de inundação. Segundo o autor, 42% da área no interior da bacia do Arroio Pelotas apresenta uma classe de fragilidade média ao processo erosivo, sendo esta caracterizada por apresentar uma declividade média, a principal forma de relevo os morros com topos convexos e vertentes suaves e o uso do solo é característico de pequenas propriedades destinado à agricultura e pecuária. Já na Planície Costeira a fragilidade média e forte ao processo de inundação compreende entorno de 18% da área da bacia, caracterizando-se por solos mal drenados, declividade fraca, uso do solo destinado ao cultivo de arroz, campo com pecuária e áreas urbanizadas. Diante dessa caracterização, observa-se que os dois compartimentos morfoesculturais (Escudo Sul-Rio-Grandense e a Planície Costeira) podem apresentar grandes interações na dinâmica hidrossedimentológica, visto que a predisposição aos processos erosivos na região do Escudo podem favorecer a desagregação e o transporte do sedimento para a calha fluvial. Já na Planície

Costeira, a reduzida declividade corrobora para redução da velocidade do fluxo e, por conseguinte deposição do sedimento que estava sendo transportado.

2.2 Processo erosivo

A erosão acelerada ocasionada pela intervenção antrópica, ocorre de forma rápida causando vários prejuízos, tanto para as práticas agropecuárias, quanto nas questões de impactos ambientais e sociais, como o êxodo rural. No Brasil em decorrência do mau uso do solo, estimativas apontam uma perda média de 600 milhões de toneladas de solo por ano, projetando prejuízos da ordem de US\$ 4 bilhões por ano (HERNANI et al., 2002). Os prejuízos ocasionados pela erosão ocorrem tanto dentro do local de produção, com a perda dos nutrientes, redução da produtividade do solo e a desvalorização da terra, quanto fora, gerando impactos ambientais principalmente nos locais de deposição do material erodido. Deste modo, os estudos do processo erosivo compreendem muitos mais que apenas os locais onde ocorre a desagregação do solo, mas também a dinâmica vinculada ao transporte e a deposição do material.

As taxas de produção de sedimento e de erosão são determinadas por condições ambientais, sendo o clima, tipo do solo, topografia, manejo e uso do solo, os fatores ambientais determinantes (TOY et al., 2002). Destas, apenas o manejo e o uso do solo podem ser controlados ou sofrer influência do homem (MORO, 2011). O desenvolvimento de práticas conservacionistas do solo tem se tornado um aliado importante na redução da perda de solo, vários autores ressaltam esta prática com êxito em relação ao preparo convencional do solo (CARVALHO et al., 2009; COGO et al., 2003; GUADAGNIN et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2012). A redução de perda de solo em sistemas com menor mobilização do solo está intimamente ligada à estabilidade dos agregados, ou seja, a resistência destas a desagregação (OLIVEIRA et al., 2012). O aumento da fitomassa decorrente das práticas conservacionistas resulta em um aumento do teor de carbono orgânico presente no solo, que por sua vez influencia positivamente na estabilidade de agregados, principalmente os de maior

tamanho (CASTRO FILHO et al., 1998; GARCIA; ROSELEM, 2010; SILVA et al., 2006; VEIGA et al., 2009).

A erosão decorrente da ação da chuva pode ser adequadamente descrita em três fases, a desagregação, transporte e a deposição (MORGAN, 2005), sendo que na escala de bacia hidrográfica é que se pode observar e melhor compreender todos os processos envolvidos. A primeira fase é causada pelo impacto da gota da chuva, ocasionando a desagregação do solo. As operações de preparo convencional do solo e o pisoteio dos animais contribuem para a intensificação do processo de desagregação. As partículas oriundas da desagregação são transportadas junto com o escoamento superficial, até que o transporte fique limitado pela sua reduzida capacidade em relação à carga do solo desagregado, ocorrendo então à deposição do material.

Em áreas agrícolas podem-se destacar como principais tipos de erosão, a erosão entressulcos e em sulcos, no entanto, em escala de bacias hidrográficas outros tipos de erosão podem apresentar significativa influência na produção de sedimentos, dentre eles destacam-se a erosão em estradas, voçorocas, erosão subsuperficial (pipes), erosão fluvial, e a erosão por fluxo de massa (HADLEY et al., 1985; MINELLA et al., 2010). Na erosão entressulcos a desagregação do solo ocorre pelo impacto da gota da chuva e o transporte ocorre pelo salpicamento das gotas e pelo escoamento difuso, já na erosão em sulcos o escoamento concentrado é o responsável pela desagregação e o transporte (HADLEY et al., 1985; OLIVEIRA et al., 2012).

A erosão hídrica, responsável pela perda de solo e conseqüentemente o incremento da produção de sedimento, torna-se um dos principais fatores na degradação dos recursos hídricos. Contudo, a erosão não afeta apenas o local onde ocorreu, mas também fora deste. Assim os estudos do processo erosivo devem contemplar também os locais para onde o material erodido foi transferido (MINELLA, et al., 2010). Ainda segundo os mesmos autores, o estudo dos efeitos do local de ocorrência e fora dele, são dependentes de estudos de diferentes escalas, desde parcelas, encostas até as bacias hidrográficas.

Diante disso, observa-se que conforme altera-se a escala dos estudos, ocorre modificações na fase do processo erosivo envolvido e aumenta a complexidade. Na escala de bacia a interação envolvendo os diferentes ambientes que compõem a

paisagem e os diferentes processos erosivos, refletem nas características das descargas líquidas e sólidas na seção de controle (MINELLA, et al., 2010).

Assim, o monitoramento da produção de sedimentos de uma bacia hidrográfica, medida na sua seção de controle pode refletir os processos hidrossedimentológicos e inferir sobre as medidas de manejo e uso do solo adotado a sua montante, bem como relacionar com as condições climáticas e as características morfológicas da bacia. Merten e Minella (2006) observaram, na bacia experimental de Arvorezinha, que o aumento de 37,7% da área de produção de fumo gerou um aumento de 25% na produção de sedimento no ano de 2003 comparado a 2002. Ainda na mesma bacia hidrográfica, a adoção de práticas conservacionistas em 43,2% da área da bacia, reduziu em torno de 70,1% a produção de sedimentos na bacia (MINELLA et al., 2009). Didoné et al. (2014), trabalhando em uma bacia no Noroeste do Rio Grande do Sul, observaram que apesar da bacia possuir baixo potencial a erosão (80% da área utiliza o sistema de plantio direto) apresenta valores elevados de produção de sedimento. Os autores colocam a contribuição dos sedimentos provenientes das estradas, a erosão profunda em canais formando até voçorocas, falhas no manejo de rotação de culturas, estrutura do solo degradada e a falta de práticas conservacionistas como principais aspectos relacionados a isto.

Quando muda-se a escala de análise de uma área experimental ou de uma lavoura para a bacia hidrográfica ocorre problemas de conectividade entre as áreas vertentes, que correspondem as áreas de maior captação de água da chuva e possuem a função de condicionar os escoamentos superficiais e subsuperficiais (BARROS, 2012) e a dinâmica na rede de drenagem (MINELLA; MERTEN, 2011). As evidências do uso e manejo do solo na produção de sedimentos são menos claras, devido a complexidade do relevo, construções humanas, vegetações fragmentadas, afetando a conectividade entre as áreas de vertente e os cursos d'água (MINELLA; MERTEN, 2011).

2.3 Monitoramento Hidrossedimentológico

Para uma melhor compreensão da interação dos processos hidrossedimentológicos de uma bacia, com os efeitos de uso e manejo do solo, necessita-se do monitoramento das variáveis envolvidas (MINELLA; MERTEN, 2011), sendo como principais variáveis, vazão, concentração de sedimentos em suspensão, precipitação e sedimento transportado em arraste. O monitoramento deve ser capaz de representar de maneira adequada a produção de sedimentos, este por sua vez necessita de técnicas apropriadas para sua estimativa, sendo realizadas de acordo com o objetivo do estudo. Os estudos que compreendem a dinâmica do transporte de sedimentos necessitam de longos períodos de tempo e significativos investimentos na instalação de equipamentos e mão de obra treinada no desenvolvimento e aplicação das técnicas necessárias. Apesar da demanda de tempo e investimentos, o monitoramento pode-se tornar uma ferramenta na escolha de técnicas que aumente o armazenamento de água no solo, diminuição do assoreamento de rios e reservatórios e melhoria na qualidade da água (BARROS, 2012).

Vestena et al. (2007) destacam o problema de entender a dinâmica do sedimento em suspensão a partir de medições pontuais com intervalos grandes de tempo, principalmente em bacias pequenas. Quando se realiza medições periódicas, em intervalos grandes, é difícil de conseguir estimar de maneira adequada a produção de sedimentos em uma bacia, visto que grande parte da descarga sólida ocorre durante os eventos de chuva, dificultando conciliar as medições no dia do evento de chuva. Sendo assim, quanto maior a frequência de amostragem, melhor será a representatividade e a qualidade dos resultados (MINELLA; MERTEN, 2011; RODRIGUES, 2011). Chen et al. (2012), observaram que quando se utiliza uma frequência menor ou um intervalo maior entre dados, como por exemplo dados diários, verifica-se a tendência de subestimar a produção de sedimentos em comparação com dados a cada 15 minutos.

Mesmo em grandes bacias hidrográficas os eventos de chuva representam grandes impactos na produção de sedimentos, sendo os eventos extremos de chuva responsáveis pelo carreamento de elevados volumes de sedimentos. Didoné et al. (2014) observaram, na bacia hidrográfica do Rio Conceição e na bacia hidrográfica do Rio Guaporé no RS, em julho de 2011, que um evento de 120 mm gerou mais de 90% da produção de sedimentos para o mês em ambas as bacias. Defersha e Melesse (2012) também observaram uma grande contribuição de eventos extremos na

produção de sedimentos, chegando a contribuir com 56.5% na produção total de sedimentos durante o período estudado. Apesar de pouco frequentes os eventos extremos foram responsáveis por 66% da produção de sedimentos durante 34 anos de observação em uma bacia no estado de Arizona/EUA (POLYAKOV et al., 2010). Assim torna-se imperativo o monitoramento da produção de sedimento durante os eventos de precipitação, sendo de suma importância à coleta de amostras que discretizem adequadamente a descarga sólida de cada evento.

O sedimento oriundo do processo erosivo da bacia pode ser separado em duas classes de transporte: (i) transporte em arraste e (ii) transporte em suspensão, sendo estes, definidos de acordo com o mecanismo de transporte. Na primeira move-se junto ou perto do leito do canal, deslizando, rolando ou saltando, já na segunda, o sedimento é transportado através da coluna d'água pelo fluxo turbulento (WILCOCK et al., 2009). Ainda segundo os autores, de uma maneira geral, quando o sedimento apresenta em média, diâmetro menor que 1/8mm, este tem uma tendência de ser transportado em suspensão, diâmetros maiores que 8mm são transportados em arraste e aqueles que apresentam um diâmetro intermediário podem ser transportados tanto em suspensão como em arraste, dependendo da energia do fluxo. Bunte e MacDonald (1999) descrevem que não há um diâmetro específico que separa rigorosamente o transporte em arraste do transporte em suspensão, no entanto é necessária esta distinção, visto que os processos que os governam são, muitas vezes, diferentes e também porque as técnicas de amostragem são distintas para cada um destes componentes. O que pode-se observar é que o transporte de partículas de diferentes diâmetros é afetado pelas condições de fluxo, conforme aumenta-se a velocidade de escoamento, gerando fluxos maiores, sedimentos mais grosseiros como areia podem começar a ser transportados em suspensão.

Em um trabalho analisando os deltas de 51 rios ao redor do mundo, Syvitski e Saito (2007) observaram, em média, que o transporte em arraste representa 6,6% da carga total de sedimentos. No Brasil, geralmente é atribuído um valor muito semelhante à descarga sólida de arraste (10%) em relação a descarga sólida total (BELINASSO, 2002; CARVALHO, 2008), sendo a maioria do sedimento transportado em suspensão. Por ser muito mais expressiva a carga de sedimento em suspensão, a maioria dos trabalhos não contemplam a descarga de arraste ou então utilizam métodos de estimativas indiretas que utilizam características hidráulicas em seus

equacionamentos. Isto não está relacionado apenas pela pouca importância do sedimento transportado em arraste, mas também pela dificuldade de estimativa deste devido os processos que o norteiam, apresentando grande variabilidade espacial e temporal (BUNTE et al., 2004). Enquanto que a distribuição do sedimento em suspensão na coluna d'água é mais afetada pela turbulência do fluxo, o atrito com o leito é um fator importante no transporte de sedimento de arraste (BUNTE; MACDONALD, 1999).

Devido as dificuldades de medição do transporte de sedimento em arraste, observa-se o desenvolvimento de um grande número de equações para a estimativa desse transporte, sob diferentes condições hidráulicas e tamanhos de sedimento, partindo da premissa que existem relações específicas entre as variáveis hidráulicas, condições sedimentológicas e as taxas de transporte em arraste (BATALLA, 1997). No entanto o uso destes métodos deve ser visto com cautela na estimativa da descarga em arraste. Scapin et al. (2007) observaram em um estudo em Santa Maria/RS que nenhum dos métodos utilizados para estimar a descarga em arraste reproduziu satisfatoriamente os valores medidos. Haddadchi et al. (2013) em um estudo para tentar estimar a produção de sedimentos por meio de diferentes equacionamentos, observaram que estas preveem muito melhor a descarga total de sedimentos em rios com leito de areia do que em rios com leito de cascalho. Já Barry et al. (2004) descreveram como perturbador o desempenho das equações testadas para a estimativa do sedimento transportado em arraste, em 24 rios do estado de Idaho/EUA. No entanto, os autores observaram um bom desempenho no transporte de sedimento de arraste quando aplicado uma função potencial, sendo esta uma equação empírica calibrada com os dados observados. O modelo empírico de descarga de arraste geralmente é determinado em função da vazão, devido a facilidade de obtenção e também pelo grande número de possíveis aplicações.

Mesmo que uma grande parcela dos trabalhos com produção e transporte de sedimentos não quantifique a descarga em arraste, este pode representar uma expressiva parcela da produção total de sedimentos em algumas regiões. Rovira et al. (2005) observaram em um rio no Mediterrâneo o aporte 80% do total de sedimentos transportado em arraste, já Turowski et al. (2010) descreve que em rios de montanhas o transporte em arraste pode chegar em até 40%. No caso do Arroio do Ouro observa-se durante os eventos de precipitação um aporte expressivo de sedimentos

transportado por arraste, sendo de extrema relevância a sua quantificação de maneira adequada a partir de medições in loco para obter a variação temporal da descarga de sedimento em arraste. Assim destaca-se que é necessário conhecer os tipos de transporte de sedimentos que atuam em um curso d'água, para poder determinar a partir de metodologias adequadas a descarga sólida total, não correndo o risco de deixar de determinar um mecanismo de transporte de expressiva importância.

O sedimento transportado em suspensão apresenta uma grande variabilidade temporal durante a ascensão e recessão do hidrograma, com isso, a coleta de amostras com intervalos grandes de tempo pode ocultar estas variações, mascarando o entendimento sobre o comportamento do sedimento em suspensão. As técnicas utilizadas na amostragem de sedimentos em suspensão são geralmente metodologias tradicionais consagradas que utilizam dispositivos manuais, possibilitando a coleta de uma amostra representativa da mistura água mais sedimentos em movimento (DIPLAS et al., 2008). No entanto, as amostras coletadas com amostradores manuais podem não suprir a necessidade de informações para a determinação da descarga de sedimentos em suspensão, pois para bacias que apresentam um tempo de concentração pequeno o tempo de subida e descida do hidrograma muitas vezes não é suficiente para a coleta de um número de amostras expressivas. Outro motivo está relacionado com a periodicidade das amostragens, o monitoramento com altas frequências apresentam como principais implicações o tempo moroso e o custo para o deslocamento até a seção de monitoramento, além da necessidade de mão de obra especializada, aumentando o custo de coleta e da análise da concentração de sedimento em suspensão (MINELLA; MERTEN, 2011).

Assim, visto a dificuldade de monitorar todos os eventos de precipitação, necessita-se o uso de estratégias alternativas para determinar a descarga de sedimento em suspensão e a produção de sedimentos a partir de variáveis hidrológicas. Uma destas estratégias pode ser a construção de uma curva-chave entre os pares de vazão e concentração de sedimentos em suspensão, monitoradas em eventos com diferentes magnitudes (MINELLA, 2007). No entanto, mesmo sendo a curva-chave muito utilizada, observam-se inúmeras limitações ao seu emprego, sendo a concentração de sedimentos em suspensão susceptível de ser subestimada a partir da vazão (ASSELMAN, 2000). Segundo o autor, as incertezas da curva-chave são principalmente causadas pela variação no fornecimento de sedimentos, ocasionado

pelas condições antecedentes da bacia, efeitos sazonais e as diferenças de disponibilidade de sedimentos no início e no final do hidrograma.

Outra alternativa possível está no emprego da relação entre a vazão de pico (vazão máxima) e a produção de sedimentos. A partir de medidas de vazão e concentração de sedimentos em suspensão estima-se a produção de sedimentos de cada evento, sendo está relacionada com a vazão de pico. Minella (2004), na bacia experimental de Arvorezinha/RS, observou uma correlação significativa entre a produção de sedimentos e vazão máxima multiplicada pelo escoamento total. Da mesma forma, Rodrigues (2011) e Rodrigues et al. (2014), em uma bacia hidrográfica florestal de Eldorado do Sul/RS, observaram correlações significativas da produção de sedimentos entre o escoamento superficial, coeficiente de escoamento superficial (C) e o produto entre escoamento superficial e vazão máxima, destacando que tais variáveis hidrológicas podem ser utilizadas na estimativa da produção de sedimentos. Duvert et al. (2012), em um estudo em 8 bacias hidrográficas de 3 países (França, Espanha e México), observaram que das 11 correlações entre variáveis hidrológicas e a produção de sedimentos a relação com a vazão máxima foi a que apresentou o melhor desempenho. Desta maneira, a relação construída entre as duas variáveis, em eventos de diferentes magnitudes, pode ser utilizada para estimar a produção de sedimentos a partir da vazão máxima (MINELLA, 2007) e de outras variáveis hidrológicas.

Visto as dificuldades apresentadas em determinar de maneira adequada e detalhada a concentração de sedimentos em suspensão, tem-se utilizado equipamentos automáticos na determinação da concentração de sedimentos em suspensão, reduzindo assim as incertezas associadas com a estimativa do fluxo de sedimentos em suspensão (MERTEN et al., 2014). Dentre os equipamentos automáticos, o sensor de turbidez (turbidímetro) tem sido amplamente utilizado, tanto pela sua facilidade de implantação no local, quanto pela boa correlação entre a turbidez e a concentração de sedimentos em suspensão (MINELLA, 2007; MINELLA et al., 2008). Segundo Barros (2012) o princípio de funcionamento está baseado na dispersão ou absorção dos raios de luz devido a presença de material em suspensão na água.

No entanto, para a utilização do turbidímetro de maneira adequada e expressar de maneira confiável a concentração de sedimentos em suspensão é necessário

calibrá-lo, convertendo o sinal medido em valores de concentração de sedimentos em suspensão. De acordo com Minella et al. (2008) são necessários dois passos para calibração do sensor, o primeiro consiste na utilização de uma suspensão padronizada (geralmente utiliza-se solução de Formazina) para testar o funcionamento do equipamento e para confirmar a eficiência do sensor. A segunda etapa estabelece a relação entre a concentração de sedimento em suspensão e o sinal de turbidez. Nesta segunda etapa é possível relacionar o sinal de turbidez com a concentração de sedimento em suspensão no exato instante da amostragem ou então utilizar o sedimento coletado de vários eventos de chuva para preparar soluções de diferentes concentrações, a partir deste material. Este segundo método deve ser utilizado com cautela, visto que a granulometria do material em suspensão é variável de acordo com as características do fluxo. Merten et al. (2014), observaram que o turbidímetro, quando submetido a uma determinada concentração com amostras de diferente granulometria, resulta em valores diferentes de turbidez. Os turbidímetros apresentam uma maior sensibilidade para partículas de menor diâmetro, devido as partículas menores como a argila apresentarem uma maior área superficial por unidade de massa, apresentando uma maior probabilidade de interceptação da luz (MERTEN et al., 2014).

Desta forma, a melhor alternativa é, durante o evento de cheia, relacionar o sinal do sensor no momento da coleta com a concentração de sedimento em suspensão presente na amostra. Vários autores obtiveram bons resultados na estimativa da concentração de sedimentos em suspensão com o uso do turbidímetro, no entanto todos enfatizam a necessidade prévia da calibração do sensor (MINELLA et al., 2008; PAVANELLI; PAGLIARANI, 2002; PELLEGRINI et al., 2010). No entanto, o monitoramento automático com o uso do turbidímetro, que permite uma discretização temporal muito importante do fluxo de sedimentos, deve ser utilizado em conjunto com estratégias tradicionais, visto as necessidades de verificações e calibração (MINELLA; MERTEN, 2011).

3 Material e Métodos

3.1 Localização da área experimental

A bacia hidrográfica do Arroio do Ouro (Figura 1) é uma sub-bacia do Arroio Cadeia que compõe a bacia hidrográfica do Arroio Pelotas, e se localiza entre os municípios de Pelotas e Morro Redondo, RS. A bacia está inserida na região geomorfológica do Escudo Sul-Rio-Grandense, no qual o seu escoamento converge para a bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo que compreende 9 municípios da região Sul do Estado do Rio Grande do Sul, com uma extensão de 25.961,04Km² (SEMA, 2015). A bacia hidrográfica deste estudo possui como principal ocupação a agricultura em pequenas propriedades familiares, observando-se o cultivo de espécies como pêssego, milho e tabaco, além de atividades de pecuária leiteira e avicultura.

Uma seção de controle hidrométrico e sedimentológico foi definida como base para o monitoramento (31°34'17" de latitude sul e 52°33'44" de longitude oeste), disposta no exutório do Arroio do Ouro, distante aproximadamente 36km do Campus Porto da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). O Arroio do Ouro é um tributário do Arroio Cadeia que por sua vez é um afluente do Arroio Pelotas. O Arroio Pelotas possui sua nascente no município de Canguçu/RS e desembocadura no Canal São Gonçalo, já no município de Pelotas, sendo o curso d'água principal da maior bacia hidrográfica do município, importante fonte de abastecimento de água para o município de Pelotas.

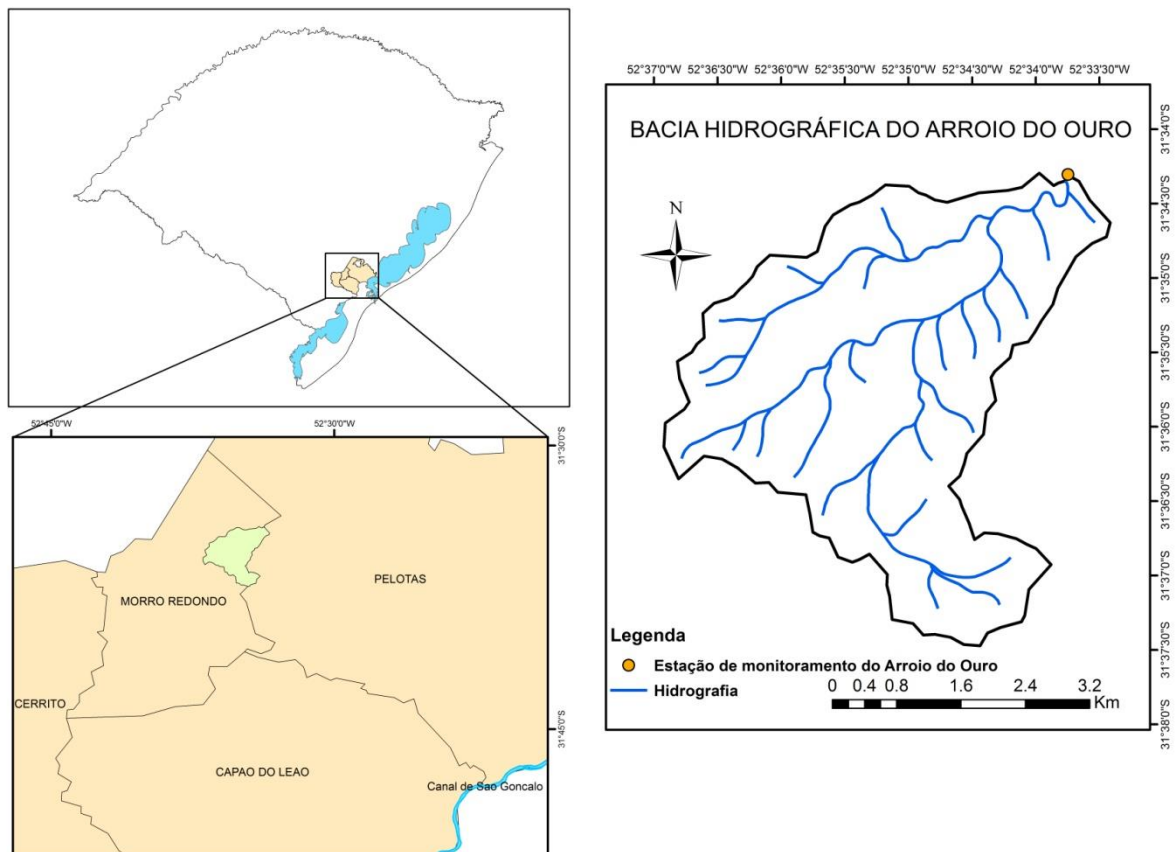


Figura 1 – Localização da Bacia Hidrográfica do Arroio do Ouro entre os municípios de Pelotas e Morro Redondo-RS.

3.2 Caracterização da bacia hidrográfica

Para a caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro, foram definidas as seguintes características físicas da bacia: área, perímetro, fator de forma (K_f), coeficiente de compacidade (K_c), índice de conformação (I_c), elevação mínima, média e máxima, declividade média e máxima da bacia, declividade do curso d'água principal, sinuosidade do curso d'água principal, densidade de drenagem (D_d), tempo de concentração (t_c) (Tabela 1).

O fator de forma da bacia (K_f) é a razão entre a largura média da bacia e o seu comprimento axial. Quanto menor for esse valor, menor será a propensão a enchentes. O coeficiente de compacidade (K_c) é a relação entre o perímetro da bacia e o perímetro de um círculo de mesma área da bacia. O valor de K_c é sempre maior que 1, e quanto mais próximo da unidade maior é a propensão à grandes enchentes. O índice de conformação (I_c) compara a área da bacia com a área do quadrado de

lado igual ao comprimento axial. Quanto mais próximo da unidade, maior a propensão à picos de cheia. Observando os coeficientes K_c , K_f e I_c descritos na tabela 1, estes demonstram que essa bacia apresenta uma baixa tendência a ocorrência de enchentes e picos de cheias.

Tabela 1– Caracterização morfológica da Bacia Hidrográfica do Arroio do Ouro.

Características	Valores
Área	17,17km ²
Perímetro	21,47km
Fator de forma (K_f)	0,45
Coeficiente de compacidade (K_c)	1,45
Índice de conformação (I_c)	0,47
Densidade de Drenagem (D_d)	1,86km km ⁻²
Declividade do curso d'água principal	0,017m m ⁻¹
Tempo de concentração (t_c)	82min
Elevação mínima	76,39
Elevação média	194,26
Elevação máxima	325,87
Declividade média (%)	12,90
Declividade máxima (%)	48,21

A densidade de drenagem (D_d) representa a quantidade de canais existentes em uma determinada bacia, sendo determinada pelo somatório do comprimento da hidrografia da bacia dividido pela área da mesma, sendo a bacia hidrográfica do Arroio do Ouro classificada como de boa drenagem.

A declividade do curso d'água principal, da mesma forma que a declividade da bacia, afeta diretamente o tempo de concentração de uma bacia hidrográfica. Quanto maior a declividade, maior será a velocidade de escoamento e menor o tempo de concentração (VILLELA; MATTOS, 1975). A declividade do curso d'água principal foi determinada pelo método S_3 , na qual se efetua o somatório das declividades de cada trecho entre curvas de nível (Equação 1).

$$S_3 = \left[\frac{L}{\sum_1^n \left(\frac{L_i}{\sqrt{S_i}} \right)} \right]^2 \quad (1)$$

Onde:

ΔH = diferença de cota (m);

L = comprimento em planta do curso d'água (m);

L_i = extensão horizontal de cada um dos n trechos (m);

S_i = declividade em cada um dos n trechos ($S_i = \Delta H_i/L_i$) ($m\ m^{-1}$).

Outra característica morfológica determinada foi o tempo de concentração (T_c). O T_c representa o tempo na qual o escoamento decorrente de uma precipitação qualquer, ocorrida no ponto mais remoto da bacia, levaria para chegar até uma seção de controle (o exutório). A equação utilizada para determinar o T_c da bacia em estudo é a equação de Ven Te Chow (Equação 2), dependente do comprimento e da declividade média do rio principal.

$$T_c = 52,64 \times \left[\frac{L}{\sqrt{S_o}} \right]^{0,64} \quad (2)$$

Onde:

T_c = tempo de concentração (minutos);

L = comprimento do rio principal (km);

S_o = declividade média do talvegue ($m\ km^{-1}$).

Para determinar a elevação mínima, média e máxima da bacia do Arroio do Ouro (Figura 2), foi utilizado o modelo digital de elevação do terreno (MDE) gerado a partir de ferramentas de Sistema de Informação Geográfica (SIG), onde o MDE foi gerado a partir de dados de curvas de nível do terreno, pontos cotados e hidrografia.

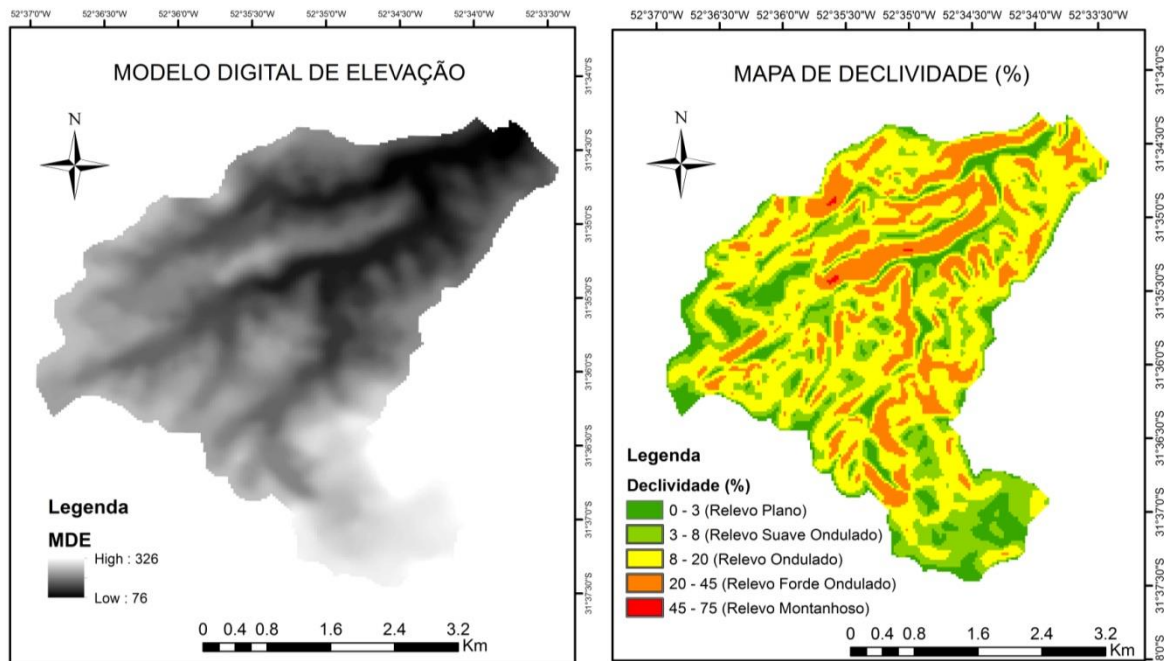


Figura 2 – Modelo digital de elevação (MDE) e mapa de declividade da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

A declividade da bacia, importante característica morfológica, afeta diretamente o tempo de concentração da bacia e a possibilidade da formação de processos erosivos, que pode ser intenso se apresentar uma declividade acentuada em condições de inadequado uso e manejo do solo. Para realizar a determinação da declividade média e máxima também foram empregadas ferramentas do SIG. Conforme observado na figura 2 e apresentado na tabela 2, o relevo ondulado é predominante, 46,9% da área (declividade entre 8 - 20%), seguido pelo suave ondulado e forte ondulado com 21,7 e 19,4% da área respectivamente.

Tabela 2 – Distribuição das classes de declividade e as formas do relevo da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Declividade (%)	Relevo	Área (km ²)	Área (%)
0-3	Plano	2,04	11.9
3-8	Suave Ondulado	3,73	21.7
8-20	Ondulado	8,05	46.9
20-45	Forte Ondulado	3,34	19.4
45-75	Montanhoso	0,02	0.1
>75	Forte Montanhoso	0,00	0.0

A bacia hidrográfica do Arroio do Ouro localizada na província geomorfológica do Escudo Sul-Rio-Grandense, mais precisamente nas regiões fisiográficas da serra

do sudeste e encosta do sudeste, se caracteriza por apresentar predomínio de Argissolos, Neossolos, Planossolos e Cambissolos (Streck et al., 2008). Especificamente na região da bacia, Cunha et al. (1996) determinou as classes de solo através de um acervo técnico da Agência da Lagoa Mirim (ALM). Os solos foram classificados em Podzólicos Bruno acinzentados, Podzólicos Vermelho Amarelo, Regossolos e Litossolos. As classes de solo foram reorganizadas de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos de 2006, apresentando para a bacia solos das classes de Argissolos e Neossolos.

Os usos do solo foram separados a partir de imagens de satélite obtidas pelo aplicativo Google Earth, no ano de 2014 e realizada conferência por caminhamento, auxiliado por GPS de navegação. Na figura 3, estão apresentados os usos do solo e observa-se como principal uso o campo nativo, destinado principalmente à bovinocultura leiteira, seguido das áreas com mata nativa. As áreas com cultivo anual são destinadas, no verão, principalmente para a cultura do milho (*Zea mays*), do fumo (*Nicotiana tabacum*) e em menor escala a soja (*Glycine max*) e, no inverno, com pastagens anuais. A mata cultivada é utilizada para extração de madeira de reflorestamentos de eucalipto e acácia negra, destinadas principalmente em carvoarias e como energia em estufas de secagem do fumo. As áreas com fruticultura observadas na figura 3, quase em sua totalidade, são cultivadas com pêssigo (*Prunus persica*), tendo como principal destino as agroindústrias da região.

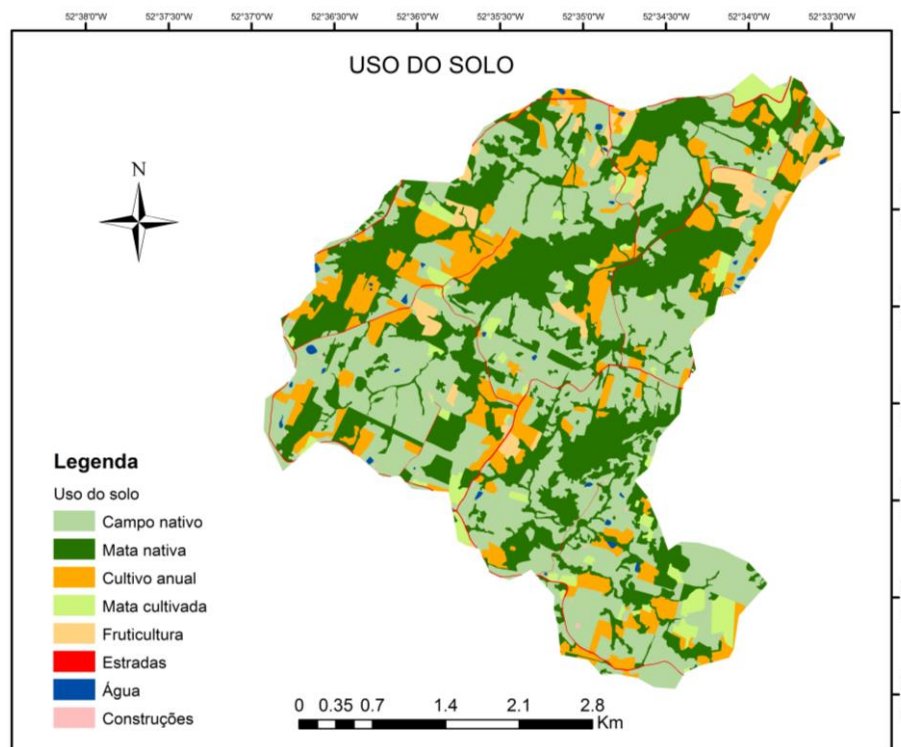


Figura 3 – Uso do solo na Bacia Hidrográfica do Arroio do Ouro.

Na tabela 3, são apresentados os usos do solo com as respectivas áreas, no ano de 2014.

Tabela 3 – Distribuição da área de ocupação e da porcentagem de cada uso do solo da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Usos do solo	Área (km ²)	Área (%)
Campo nativo	7.45	43.40
Mata nativa	5.86	34.11
Cultivo anual	2.39	13.94
Mata cultivada	0.72	4.17
Fruticultura	0.53	3.11
Estradas	0.13	0.73
Água	0.05	0.32
Construções	0.04	0.22

3.3 Monitoramento hidrossedimentológico

O monitoramento hidrossedimentológico foi realizado, com a intenção de caracterizar a produção de sedimentos, observando o maior número possível de

eventos de precipitação, durante a ascensão e recessão do hidrograma. Para tal monitoramento foi estabelecida uma estratégia que possibilitou o entendimento do comportamento da bacia frente aos diversos eventos de precipitação. As principais variáveis monitoradas foram: vazão, concentração de sedimentos em suspensão, sedimento transportado por arraste e a precipitação.

O estudo, nessa bacia experimental, teve início em fevereiro de 2013 com a escolha do local da seção de controle. Nessa seção foram instalados três lances de réguas linimétricas e um referencial de nível (RN). Para suprir a necessidade das medições de vazão, concentração de sedimentos em suspensão e sedimento transportado por arraste, foi construída uma estrutura (Figura 4) para que os acessos de equipamentos e estratégias das medições e amostragens conseguisse mensurar de maneira adequada a descarga líquida e sólida nos mais diversos eventos de chuva.



Figura 4 – Estrutura construída para realizar as medições de vazão, concentração de sedimentos em suspensão e sedimento transportado em arraste (a) e detalhe da instalação do guincho hidrométrico (b) na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Paralelo as medições pontuais, para um melhor entendimento das variáveis monitoradas, foi necessário realizar monitoramento temporal contínuo, para isto foram empregadas estações automatizadas, compostas basicamente de uma fonte de energia (geralmente uma bateria acoplada a um painel solar), sistema de coleta e armazenamento de dados (datalogger) e os sensores necessários para mensurar as

variáveis hidrológicas. No caso deste estudo foram utilizados sensores de precipitação (pluviógrafos), pressão (nível), turbidez, temperatura e umidade.

Na seção de controle, o monitoramento hidrossedimentológico contínuo começou em fevereiro de 2014, com uma estação automática da marca nacional Solar Instrumentação modelo SL2000-PNV, composta por um pluviógrafo, sensor de nível e sensor de turbidez (turbidímetro), planejada para a coleta temporal de dados a cada 5 minutos.

3.3.1 Monitoramento da precipitação

A precipitação foi monitorada na área da bacia com o emprego de 4 pluviógrafos de básculas, em períodos de tempo distintos. O pluviógrafo de básculas realiza um movimento tipo gangorra, que captura um pulso elétrico, registrado no datalogger, transformado em volume de precipitação, de acordo com as características construtivas do equipamento. Os pluviógrafos utilizados apresentam uma resolução de 0,2mm por basculada e um diâmetro de 200mm. Para a escolha dos locais de instalação das estações automáticas, observaram-se posições no interior da bacia, que melhor expressasse as variáveis medidas e também as condições de acesso. As estações foram identificadas da seguinte forma: EH-HS03, E-01, E-02 e E-03, descrita na figura 5.

Para o cálculo da precipitação média incidente sobre a bacia, foi utilizado o método dos polígonos de Thiessen (Equação 3), no qual cada pluviógrafo apresenta uma área representativa da precipitação no interior da bacia (Figura 5).

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i \times A_i)}{A_t} \quad (3)$$

Onde:

P_m = precipitação média na bacia (mm);

P_i = precipitação incidente do pluviógrafo i (mm);

A_i = área representativa do pluviógrafo i (km²);

A_t = área total da bacia (km²).

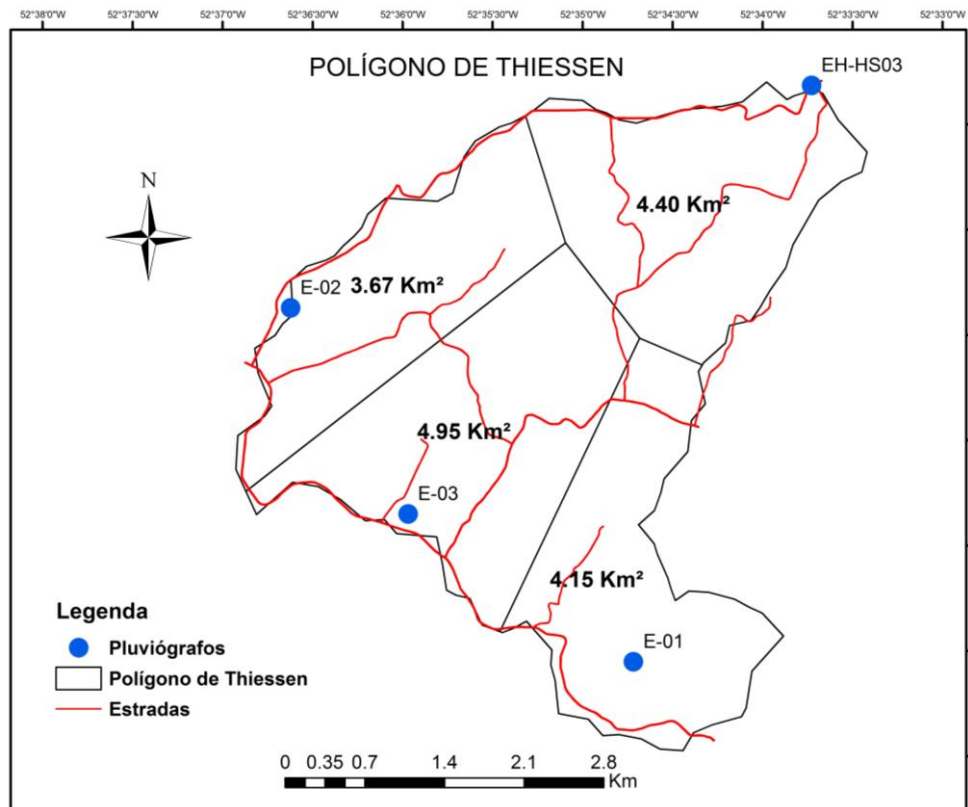


Figura 5 – Localização dos pluviômetros no interior da bacia e a área representativa de cada pluviômetro.

O pluviômetro (EH-HS03) foi instalado junto à seção de controle no Arroio do Ouro, com início de funcionamento em fevereiro de 2014, coletando dados a cada 5 minutos. Os outros três pluviômetros (E-01; E-02; E-03) são da marca AgSolve modelo TB4, com características e funcionamento semelhante ao do localizado na seção de controle. Estes três entraram em funcionamento em abril de 2014, coletando dados a cada 15 minutos, foram instalados na região com maior altitude da bacia, próximos aos divisores de água e nascente do canal principal (Figura 6).



Figura 6 – Imagens representativas do pluviômetro EH-HS03 (a, b) e dos pluviômetros E-01, E-02 e E-03 (c) na Bacia Hidrográfica do Arroio do Ouro.

3.3.2 Monitoramento da descarga líquida

Para representar de maneira adequada o volume de água que escoar em um determinado tempo (vazão), foi necessário o uso do molinete hidrométrico com auxílio de um guincho hidrométrico. Como na seção de monitoramento observou-se grandes volumes de escoamento durante alguns eventos de chuva, não foi possível construir uma estrutura hidráulica que permitisse observar precisamente a vazão.

Para expressar a vazão, foi utilizado o método convencional de medição, empregando molinete hidrométrico para a medida da velocidade de escoamento na respectiva área da seção transversal do rio (SANTOS et al., 2001). A velocidade de deslocamento da água na seção de controle foi medida com o auxílio do molinete hidrométrico OTT C31 (Figura 7), onde o número de rotações é convertido em velocidade, através de equações fornecidas pelo fabricante. Para a obtenção da área da seção, inicialmente foi medido a largura da seção, seguido da divisão deste em verticais de 50 ou 100cm de largura, em função da largura total da seção, nas quais foram medidas velocidades em diferentes profundidades, baseando-se no método simplificado (SANTOS et al., 2001). No início e no final de cada medição foram anotados os horários e as cotas de início e fim, para poder criar uma relação entre a vazão e a cota observada nas réguas linimétricas.



Figura 7 – Molinete OTT C31 na Bacia do Arroio do Ouro.

Os dados pareados de vazão e cota foram empregados para desenvolver uma curva-chave de acordo com a equação 4. A curva-chave de vazão é utilizada para estimar a vazão apenas com a cota observada em uma régua linimétrica.

$$Q = k \times (h - h_0)^n \quad (4)$$

Onde:

Q = vazão ($m^3 s^{-1}$);

H = cota medida na régua linimétrica (cm);

h_0 = cota da régua linimétrica com vazão igual a zero (cm);

k e n = parâmetros de ajuste da equação.

A equação 4 foi construída a partir de um banco de dados de medições de vazão e cota. Para construir uma curva-chave que representasse de maneira adequada o deflúvio na seção transversal foi necessária a realização de várias medidas de vazão nas mais diversas cotas. Para o desenvolvimento da curva-chave o monitoramento de vazão foi realizado no período de março de 2013 a outubro de 2014, totalizando 45 medições em 27 eventos de precipitação. Devido à dificuldade de realizar medições com cotas mais elevadas, especialmente pela logística necessárias às medições, pelos horários que ocorrem os picos de vazões e ainda pela rapidez de ocorrência dos fenômenos, considerando as características da bacia, para dois eventos foi realizada a extrapolação da curva-chave.

A eficiência do ajuste da curva-chave foi obtida utilizando o coeficiente de Nash–Sutcliffe (NASH; SUTCLIFFE, 1970), denominado simplesmente de NS (Equação 5). Este coeficiente, que pode variar de $-\infty$ a 1, quanto mais próximo de 1, considera-se que melhor é o modelo para representar o volume de dados observados. De acordo com Silva et al. (2008) para que o desempenho do modelo seja considerado bom, o valor de NS deva ser maior que 0,75, e, quando os valores ficarem entre 0,36 e 0,75 o modelo pode ser aceitável e quando os valores forem inferiores a 0,36 será considerado inaceitável.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - Q_{esti})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{esti} - \bar{Q})^2} \quad (5)$$

Onde:

NS = coeficiente de Nash–Sutcliffe;

Q_{obsi} = vazão observada;

Q_{esti} = vazão estimada;

\bar{Q} = vazão média observada;

n = número de medições de vazão.

Os parâmetros k, n e h_0 da curva-chave, foram estimados com auxílio da ferramenta *Solver* presente na planilha eletrônica Excel. Para realizar um melhor ajuste dos dados a curva-chave foi dividida em dois segmentos, representando vazões com cotas inferiores a 78cm e vazões com cotas superiores a 78cm (Figura 8). O

coeficiente de Nash-Sutcliffe apresentou valores iguais a 0,99 para cotas menores que 78cm, e de 0,99 para cotas maiores. Assim pode-se afirmar que as duas equações expressam bem o comportamento entre os valores de cota x vazão. A figura 8 mostra a extrapolação da parte superior da curva-chave, sendo necessário utilização para dois eventos de chuva na qual apresentou cota máxima de 188cm resultando em uma vazão estimada de $30,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

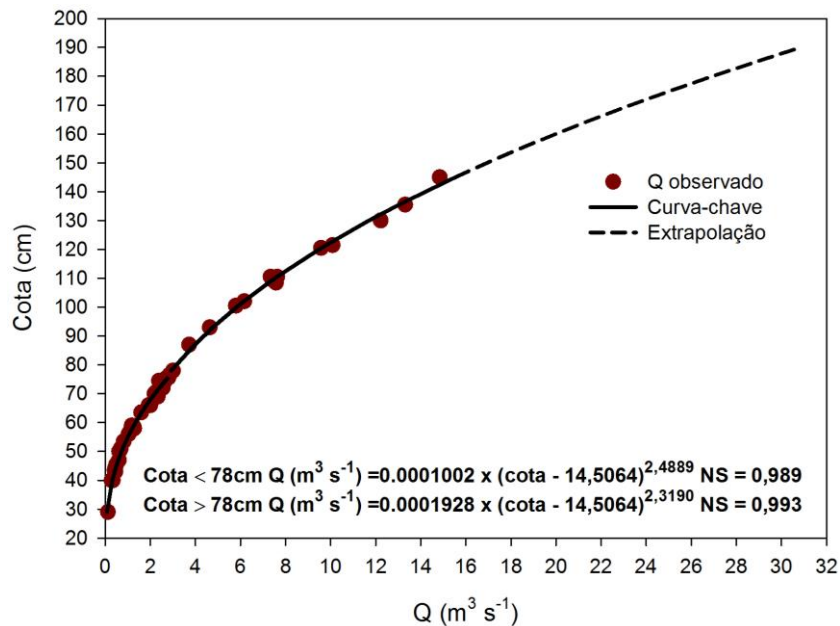


Figura 8 – Curva-chave de vazão para a bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Para monitorar continuamente a altura da lâmina d'água, foi utilizado um sensor de pressão modelo SL2000-NV. Estes sensores tem a capacidade medir as oscilações do nível, considerando um gradiente de pressão aplicado sobre ele. Com sucessivas leituras nas régua linimétricas e com os registros do sensor no datalogger da estação, considerando uma amplitude de dados adequada, foi construído uma regressão linear (Equação 6), capaz de transformar os valores de altura da lâmina de água medida pelo sensor em cota da régua linimétrica e assim aplicar na curva-chave.

$$\text{Cota} = (0,995 \times \text{LS}) + 26,508 \quad (6)$$

Onde:

Cota = cota da régua linimétrica (cm);

LS = leitura do sensor de pressão (cm).

3.3.3 Monitoramento da descarga sólida

A descarga sólida consiste na soma do sedimento em suspensão e de arraste, provenientes da erosão na bacia, erosão do próprio leito e das margens do curso d'água e erosão proveniente das estradas rurais não pavimentadas. O movimento do sedimento, decorrente da geração do escoamento superficial, pode ser por suspensão, ou no leito, rolando, deslizando ou em saltos (CARVALHO, 2000).

3.3.3.1 Concentração de sedimentos em suspensão (Css)

Para o monitoramento de sedimentos em suspensão foi empregada metodologia tradicional, que consiste na utilização de amostradores manuais de sedimento em suspensão, utilizando o método de Igual Incremento de Largura – ILL (CARVALHO, 2008).

O monitoramento da C_{ss} ocorreu no período de janeiro a outubro de 2014, totalizando 32 medições. Foram utilizados amostradores do tipo USDH-48 e USDH-59 para a obtenção de uma série temporal de dados de concentração de sedimentos, para inferir sobre o fluxo de sedimentos. As amostragens foram realizadas conforme a variação na altura da lâmina de água, sendo o número e a frequência de amostragem definidos de acordo com as condições de cada evento. Os amostradores utilizados são compostos por uma estrutura metálica em forma hidrodinâmica, na qual está disposta uma garrafa de vidro para acondicionamento da amostra, presa por uma mola e dotada de um bico na parte frontal, fabricados pela JCTM Ltda (Figura 9).

O amostrador USDH-48 é utilizado em medições a vau, em profundidades reduzidas e com baixas velocidades. Já o USDH-59 foi utilizado com auxílio de um guincho hidrométrico empregado para realizar medições em situações onde ocorreram profundidades altas e de elevada velocidade.



Figura 9 – Amostrador de sedimentos em suspensão do tipo USDH-59 (a) e amostra acondicionada na garrafa (b).

O procedimento para obtenção das amostras, na seção de controle, foi realizado com a movimentação vertical do amostrador, sempre em velocidade constante, entre a superfície e um ponto localizado aproximadamente 11 centímetros acima do leito, evitando assim o toque do amostrador no fundo do canal. Com isso, a velocidade de entrada da amostra no amostrador foi igual ou próxima da velocidade instantânea da corrente, garantindo a qualidade amostral. As amostras foram coletadas nas mesmas verticais de medição da velocidade, descartando as verticais próximas às margens do rio. Ao final da medição, as amostras de cada vertical foram agrupadas em uma amostra composta.

A determinação da C_{ss} foi obtida pelo método da evaporação, adaptado de Carvalho (2008), realizado no laboratório de Solos e Hidrossedimentologia do curso de Engenharia Hídrica da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). As amostras provenientes do campo foram colocadas em um becker de vidro, previamente pesadas, obtendo o peso total da amostra. Logo após, terem sido submetidas a repouso durante um período de 48 horas, foi retirada uma alíquota de 50ml de cada becker para descontar os sólidos dissolvidos. Imediatamente, foram levadas a estufa a 105°C até obtenção de massa constante, consideradas secas, determinando a massa do sedimento, para posterior determinação da C_{ss} .

Vestena et al. (2007) destacam o problema de entender a dinâmica do sedimento em suspensão a partir de medições pontuais com intervalos grandes de tempo, principalmente em pequenas bacias. Para tanto, quanto maior a frequência de amostragem, melhor será a representatividade e a qualidade dos resultados (MINELLA; MERTEN, 2011; RODRIGUES, 2011). Os mesmos autores, destacam ainda que os problemas associados ao monitoramento com altas frequências são, geralmente, devido ao tempo e custo para o deslocamento até a seção de monitoramento, além da necessidade de mão de obra especializada, aumentando assim o custo de coleta e da análise da C_{ss}. Para resolver este problema e na falta de mão de obra especializada, tem-se utilizado equipamentos automáticos na determinação da concentração de sedimentos em suspensão, entre estes o turbidímetro (BARROS, 2012).

O monitoramento através do sensor de turbidez requer o desenvolvimento de uma adequada relação de ajuste entre os valores de turbidez e os de concentração de sedimentos em suspensão. Para a obtenção dessa relação, são necessárias coletas de amostras de sedimentos em suspensão que represente adequadamente a variação de C_{ss} em uma determinada seção transversal do rio.

Na seção de controle do Arroio do Ouro, juntamente com o sensor ótico de turbidez (turbidímetro), foi instalado sensor de nível (Figura 10). O turbidímetro estava a aproximadamente a 1,5m da margem, dentro de um tubo de PVC rígido, utilizado para proteção do sensor, além de facilitar a sua retirada para a limpeza das janelas óticas.

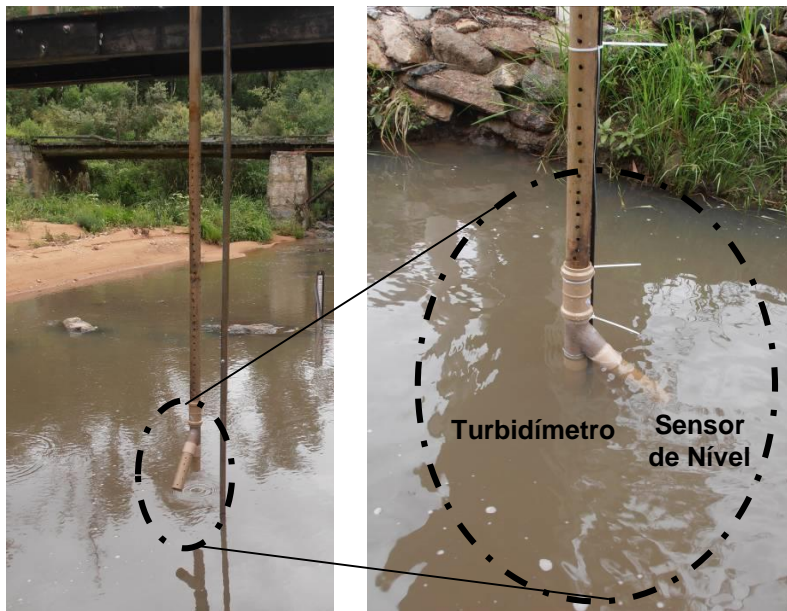


Figura 10 – Sensor de turbidez e sensor de nível.

O período de monitoramento com o uso do turbidímetro iniciou em fevereiro de 2014. Em muitas situações, especialmente após eventos extremos, observaram-se falhas no sensor, necessitando realizar sua troca, sendo descartados os dados. Estas falhas foram observadas quando o sensor era submetido a calibração com soluções de formazina e resultavam em intervalos de leitura em mV muito próximos, para diferentes concentrações em NTU. Com reduzido período de observação não se estabeleceu uma equação de regressão entre a turbidez e a C_{ss} , descartando os dados. Assim, para esse estudo, os dados observados foram de medições e amostragens realizadas no período compreendido entre abril a outubro de 2014.

A calibração do turbidímetro foi realizada em duas etapas. A primeira etapa foi desenvolvida com solução padrão empregada para verificar a eficiência do equipamento em relação à variação da turbidez da amostra, objetivando transformar a leitura do sensor, em mV (mili-volts) para unidades de turbidez (NTU ou FTU), de forma consistente. Essa calibração foi realizada com periodicidade de, no mínimo, 15 dias, utilizando como solução padrão a formazina nas concentrações de 0, 10, 40, 100, 400 e 1000NTU. Cada solução foi previamente homogeneizada para inserção do sensor de forma que este não toque no fundo e nem nas paredes do frasco (Figura 11). Antes de inserir o sensor na solução, foi devidamente limpo com esponja não abrasiva e água destilada, evitando possíveis danos nas janelas ópticas.

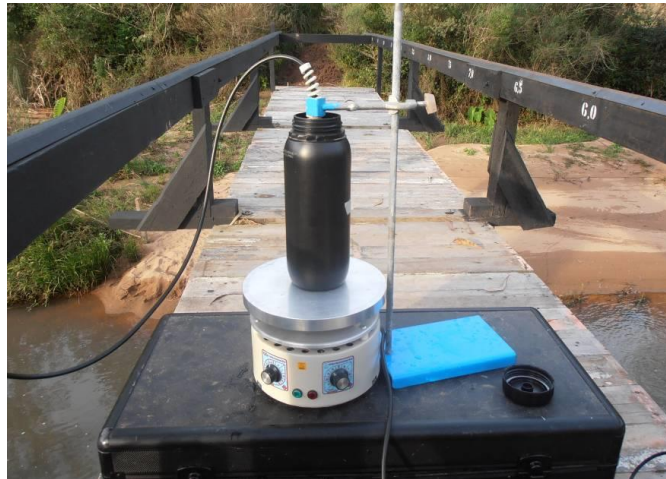


Figura 11 – Calibração do sensor de turbidez com solução de formazina.

Após realizada a leitura, o sensor foi retirado e novamente lavado com água destilada, tomando-se o cuidado de preservar a amostra. Para obtenção de um melhor ajuste da relação do sinal em mV e a solução com turbidez conhecida, foram adotadas duas parcelas correspondentes a duas equações: valores menores que 60mV (Equação 7) e maiores que 60mV (Equação 8).

$$NTU = (1,1935 \times mV) - 30,532 \quad (7)$$

$$NTU = (0,5476 \times mV) + 22,025 \quad (8)$$

A segunda etapa consistiu em transformar os valores gerados em NTU para concentração de sedimentos em suspensão em $mg L^{-1}$. Para isso, duas estratégias de calibração foram realizadas. Na primeira foi empregado material proveniente da própria bacia, coletado em amostradores do tipo torpedo, dispostos na direção do fluxo e sobre o leito do rio, próximo a seção de controle, de tal forma que possibilitam integrar e armazenar, durante um período de tempo, o sedimento em suspensão.

Os amostradores, tipo torpedo, foram confeccionados no laboratório de Solos e Hidrossedimentologia do curso de Engenharia Hídrica da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). Para confecção do torpedo foi utilizado um tubo de polietileno de 75mm de diâmetro e 850mm de comprimento, com as duas extremidades fechadas por tampas com rosca. Em cada uma das tampas foi inserido uma tubulação de 5mm de diâmetro e 50mm de comprimento para entrada da água com sedimentos numa extremidade e saída do ar na outra.

O material acumulado foi levado para laboratório, onde foi seco em estufa a 105°C até obtenção de massa constante e depois passado em peneira de malha de 63µm. O sedimento com granulometria menor que 63µm foi utilizado para confecção da curva de calibração do turbidímetro, nas concentrações de 0, 10, 40, 100, 400, 1000 e 4000mg L⁻¹.

No entanto, observou-se que o sedimento transportado em suspensão apresenta partículas maiores 63µm. Esta variação do tamanho das partículas pode resultar em valores de turbidez diferentes para uma mesma concentração. Merten et al. (2014), realizando um experimento com três marcas diferentes de turbidímetros, observaram que para uma mesma C_{ss}, para o aumento do diâmetro médio das partículas, o valor de turbidez reduz. Neste sentido, para representar de maneira mais confiável a C_{ss}, foi realizada uma segunda estratégia, na qual os resultados das medições de sedimento em suspensão, realizados in loco, foram relacionados com a leitura do turbidímetro, estabelecendo uma equação de regressão que possibilitou determinar o fluxo do sedimento em suspensão.

3.3.3.2 Sedimento transportado em arraste

O sedimento transportado em arraste apresenta uma granulometria mais grosseira, como areias, pedregulhos e cascalhos, movendo-se com velocidade diferente da corrente. O transporte deste tipo de sedimento é dependente da granulometria do material, velocidade da corrente, declividade do leito, força de atrito entre partículas e da profundidade do curso d'água (CARVALHO, 2008). As amostras para determinar o transporte do sedimento em arraste foram obtidas com amostrador do tipo Helley-Smith (Figura 12), composto por um bocal quadrado de (76 x 76mm) e uma saca de amostragem com 460mm de comprimento, com malha de 250 micrômetros (EMMETT, 1980). A descarga de sedimento de arraste pode ser extremamente variável e estas variações podem ocorrer tanto espacialmente quanto temporalmente durante condições de fluxo constante, bem como durante alterações de descarga (EDWARDS; GLYSSON, 1999). Com isso, para quantificar de maneira adequada a descarga de sedimento por arraste, necessita-se a coleta de um grande

número de sub-amostras, em várias verticais da seção transversal. Edwards e Glysson, (1999) recomendam a coleta de 40 amostras individuais na seção transversal para compor uma amostra representativa da descarga de arraste. Os mesmos autores também apontam que o tempo de coleta de cada amostra, deve ser igual para todas, no entanto não existe uma regra que defina o tempo de coleta, geralmente adota-se, no máximo, 60 segundos para cada coleta.

Considerando a necessidade de realizar medições de descarga líquida, sedimento transportado em suspensão e o sedimento em arraste, para mesmos eventos, não foi possível realizar a coleta de 40 sub-amostras para compor uma amostra composta, especialmente devido a velocidade de ascensão e recessão do hidrograma na seção de controle. Assim, o amostrador Helley-Smith foi erguido num guincho hidrométrico, na mesma posição das verticais de medição de vazão, permanecendo em cada posição durante o período de 1 minuto, compondo uma amostra composta ao longo da seção. O número de verticais, para compor uma amostra, variou de 4 a 8, dependendo das condições de escoamento.



Figura 12 – Amostrador Helley-Smith, utilizado para amostragem de sedimento transportado em arraste.

A descarga sólida de arraste foi obtida pelo processo de integração das verticais consideradas na seção, compondo uma amostra, expressa pela equação 9.

$$Q_{sa} = \frac{p \times L}{E_{am} \times n \times l \times t} \quad (9)$$

Onde:

Q_{sa} = descarga s3lida de arraste (Kg s^{-1});

p = Peso seco da amostra (kg);

L = largura da se33o transversal (m);

E_{am} = efici4ncia de amostragem do equipamento;

N = n3mero de pontos amostrados;

l = largura do bocal do amostrador (m);

t = tempo de amostragem (s).

As amostras, no laborat3rio, foram colocadas em bandejas para a retirada do material org4nico, tais como folhas, pequenos galhos e sementes. Depois foram colocadas na estufa a 105°C at4 obten3o de massa constante e posteriormente foi determinada a massa total do sedimento de arraste. Logo ap3s, posterior a pesagem das amostras, foram devidamente armazenadas para a an4lise granulom4trica do sedimento.

3.4 An4lise do comportamento hidrossedimentol3gico

O comportamento hidrossedimentol3gico da bacia pode ser analisado a partir da rela3o existente entre a precipita3o - vaz3o, precipita3o - descarga de sedimentos e vaz3o - descarga de sedimento. Nesse trabalho foi analisado o hietograma, hidrograma e o sedimentograma. O hietograma 4 representa3o da precipita3o no tempo, o hidrograma 4 a representa3o gr4fica da vaz3o no tempo, j4 o sedimentograma representa temporalmente a C_{ss}.

Para realizar essa an4lise foram selecionados 13 eventos de chuva durante o per3odo de fevereiro a outubro de 2014. Nestes eventos, foi estimada a produ3o de sedimentos, a partir dos dados da concentra3o de sedimento em suspens3o, do sedimento transportado por arraste e da vaz3o. Os dados de C_{ss} foram usados para calibrar o turbid3metro e com isso obter a varia3o temporal da descarga em

suspensão. Com o sensor de nível e a curva-chave foi estimada a vazão. A descarga de arraste foi obtida pela relação existente entre vazão e o sedimento transportado por arraste. A produção de sedimento de cada evento foi obtida pela equação 10.

$$PS = \sum_{i=1}^n [k \times (C_{ss} \times Q) + k \times (Q_{sa} \times t)] \quad (10)$$

onde:

PS = produção de sedimentos (ton);

C_{ss} = concentração de sedimentos em suspensão (mg L⁻¹);

Q = vazão (m³ s⁻¹);

k = fator de conversão de unidades;

Q_{sa} = descarga sólida de arraste (Kg min⁻¹);

t = tempo entre medições (min);

As relações entre a vazão e a C_{ss} resultam em curvas de histerese, que consiste em um atraso na evolução de um fenômeno físico em relação a outro, devendo ser observada análise qualitativa e quantitativa da histerese (MINELLA et al., 2011; RODRIGUES, 2011). A análise qualitativa é realizada através da análise do gráfico de vazão versus C_{ss}. O comportamento hidrossedimentológico da bacia pôde ser realizado a partir do sentido e do laço de histerese, que sofre influência direta das características do hidrograma e sedimentograma (MINELLA et al., 2011; RODRIGUES, 2011; WILLIAMS, 1989).

O sentido do laço de histerese pode ser horário, anti-horário e formato de oito. Uma curva no sentido horário apresenta a concentração de sedimento em suspensão no ramo crescente (C_{ss} RC) maior que a concentração de sedimento em suspensão no ramo decrescente (C_{ss} RD), para uma mesma vazão. Já para a curva no sentido anti-horário a C_{ss} RC é menor que C_{ss} RD, para uma determinada vazão. A curva com formato de oito apresenta sentido horário e anti-horário, isto ocorre, pois a vazão e C_{ss} começam a aumentar praticamente juntas, no entanto a o pico da C_{ss} ocorre primeiro produzindo uma curva horária (WILLIAMS, 1989).

De forma complementar às informações obtidas com a análise qualitativa, a utilização de uma análise quantitativa permite a comparação entre eventos de chuva

e entre bacias (MINELLA et al., 2011). Lawler et al. (2006), apresentaram uma metodologia de quantificação do Índice de Histerese (IH), para isso primeiro foi necessário calcular a vazão central do evento (Equação 11), a partir da vazão mínima e máxima do evento.

$$Q_{\text{cen}} = 0,5 \times (Q_{\text{máx}} - Q_{\text{mín}}) + Q_{\text{mín}} \quad (11)$$

Onde:

Q_{cen} = vazão central do evento ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

$Q_{\text{máx}}$ = vazão máxima do ramo ascendente ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

$Q_{\text{mín}}$ = vazão mínima do ramo ascendente ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

Para o cálculo da vazão central do evento, foi considerado os valores de C_{ss} nos ramos crescente e decrescente, a partir da análise do gráfico C_{ss} versus vazão. O IH foi calculado de duas formas, se o sentido do laço for horário, este apresenta valor positivo, sendo calculado pela equação 12, caso apresente sentido anti-horário, o IH possui valor negativo, sendo calculado pela equação 13.

$$IH = \left(\frac{C_{ssRC}}{C_{ssRD}} \right) - 1 \quad (12)$$

$$IH = \left(\frac{-1}{\frac{C_{ssRC}}{C_{ssRD}}} \right) + 1 \quad (13)$$

Onde:

IH = índice de histerese;

C_{ssRC} = concentração de sedimento em suspensão no ramo crescente;

C_{ssRD} = concentração de sedimento em suspensão no ramo decrescente;

4 Resultados e discussão

4.1 Monitoramento hidrossedimentológico

4.1.1 Monitoramento das variáveis hidrossedimentológicas em escala quinzenal

Após realizada as correlações necessárias para se obter um monitoramento contínuo das variáveis hidrossedimentológicas, ou seja, a transformação de cota monitorada pelo sensor de nível em vazão com o uso da curva-chave, a turbidez em Css e a curva de ajuste relacionado a vazão com a descarga de sedimento de arraste, foi realizado o processamento dos dados e organizado um banco de dados em escalas diárias, quinzenais e por evento de chuva durante o período de 6 meses monitorados (16/04/2014 a 15/10/2014).

A tabela 4 apresenta os dados médios, quinzenais, de precipitação total, vazão mínima, média e máxima e Css máxima. Também expressa a precipitação total dos meses monitorados. A Css mínima e média não foi abordada devido as limitações do ajuste entre a turbidez e a Css, abordados anteriormente. A precipitação total foi obtida pela média ponderadas das 4 estações localizadas no interior da bacia, observa-se que a precipitação total acumulada durante o período foi de 867,8mm. O mês de maio foi o que apresentou a menor precipitação, correspondendo a 9,2% (79,7mm) do total de chuva do período, já o mês com maior índice pluviométrico, representando 26,3% refere-se ao mês de junho, com total precipitado de 228,3mm.

Comparando os dados de precipitação observados na bacia com dados de uma estação meteorológica localizada na Embrapa Clima Temperado, distante aproximadamente 17km da seção de controle, observa-se que durante os períodos com menor precipitação (16 a 30 de abril, maio e agosto) os volumes de precipitação são muito semelhantes, no entanto na segunda quinzena de junho observa-se que um evento registrado nos dias 29 e 30 apresentou grande variação do volume precipitado, já que na bacia do Arroio do Ouro foi observado uma precipitação média de 128,9mm

e na estação da Embrapa Clima Temperado foram registrados 50,9mm de chuva. De acordo com Tucci (2009) as chuvas convectivas apresentam estas características, atuando em pequenas áreas, são de curta duração e grande intensidade, podendo causar inundações em pequenas bacias.

Tabela 4 – Dados médio, quinzenais, da precipitação total, vazão e concentração de sedimento em suspensão para o período do monitoramento na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Período	Prec. Total (mm)	Prec. Total mensal (mm)	Q (m ³ s ⁻¹)			Css (mg L ⁻¹)
			mínima	média	máxima	máxima
16 a 30/04/14	0,55	0,55*	0,090	0,190	0,355	104,90
01 a 15/05/14	70,35	90,51	0,088	0,317	10,190	1501,34
16 a 31/05/14	20,16		0,056	0,105	0,176	97,70
01 a 15/06/14	58,30	228,32	0,064	0,236	2,524	605,02
16 a 30/06/14	170,02		0,104	1,401	30,144	1939,08
01 a 15/07/14	63,01	213,58	0,246	0,906	8,971	1273,04
16 a 31/07/14	150,57		0,232	1,185	18,303	797,52
01 a 15/08/14	57,90	79,72	0,164	0,384	2,224	886,09
16 a 31/08/14	21,81		0,073	0,162	0,647	145,01
01 a 15/09/14	123,12	174,97	0,116	0,633	12,186	873,77
16 a 30/09/14	51,85		0,161	0,290	0,755	80,30
01 a 15/10/14	80,18	80,18**	0,180	0,534	8,395	-
Total		867,82				
Média			0,131	0,529	7,906	695,124

Prec. Total: precipitação média total incidente na bacia; Q: vazão; Css: concentração de sedimento em suspensão; * Precipitação acumulada de 16 a 30/04/15; ** Precipitação acumulada de 01 a 15/10/15.

Também é possível de observar a relação entre a precipitação e a descarga líquida, na qual, de maneira geral os maiores picos de vazão são característicos dos períodos com maiores volumes precipitados (Tabela 4). No entanto, observa-se que um evento que ocorreu nos dias 03 e 04/05/14, que apresenta uma vazão máxima de 10,19m³ s⁻¹, difere do comportamento padrão. Tal fato pode ser explicado pela elevada intensidade de precipitação observada neste evento, com uma intensidade máxima de 26,9mm hora⁻¹, correspondendo a maior intensidade observada durante todo o monitoramento (Tabela 5). Rodrigues (2011) observou em uma bacia experimental em Eldorado do Sul que o evento de maior intensidade de precipitação gerou a maior vazão de pico durante o monitoramento. Na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro isto não foi observado e, o evento com maior vazão de pico (30,1m³ s⁻¹), apresentou a terceira maior intensidade de precipitação (16,4mm hora⁻¹), no entanto é de se esperar para uma chuva com maior intensidade um incremento no

escoamento e vazão de pico, pois a intensidade de precipitação acaba sendo superior a capacidade de infiltração da água no solo, gerando um aumento no escoamento superficial.

Os períodos com maior vazão média também são caracterizados pelo maior volume precipitado. Dentro do período monitorado, a primeira quinzena de julho se contrapõe a este comportamento, pois, neste período foram registrados apenas 63mm de chuva e, no entanto, foi a terceira maior vazão média ($0,91\text{m}^3\text{ s}^{-1}$), permanecendo acima da média geral do período ($0,53\text{m}^3\text{ s}^{-1}$). Observa-se que um evento de grandes magnitudes (128,9mm) ocorrido nos dois últimos dias da quinzena anterior corroborou para elevação da vazão média no início do período. A vazão média de $1,2\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ observada nos 3 primeiros dias da quinzena, juntamente com dois eventos que ocorreram entre o quarto e o sexto dia, totalizando 47,7mm de precipitação, foram os responsáveis pelo aumento da vazão média no período.

O valor máximo de concentração de sedimentos em suspensão de $1,9\text{g L}^{-1}$ foi observado em junho, no período com a maior precipitação acumulada (170mm), sendo esta observada em um evento que apresentou o maior pico de vazão e também a maior produção total de sedimentos (Tabela 5). No entanto a segunda e a terceira maior C_{ss} ($1,5\text{g L}^{-1}$ e $1,3\text{g L}^{-1}$) respectivamente, foram observadas em períodos com precipitação acumulada não tão elevadas (70,35 e 63,01mm). Estes valores elevados de C_{ss} são decorrentes de dois eventos de precipitação que apresentaram as maiores intensidades durante o período de monitoramento (Tabela 5). A época da colheita das principais culturas anuais de verão, plantadas na bacia (milho, fumo e soja) é outro fator que corrobora com valor elevado de C_{ss} registrado na primeira quinzena de maio, visto que com a colheita destas culturas, muitos agricultores realizam o preparo do solo para a semeadura de pastagens de inverno, tais como o azevém e a aveia. Neste período muitas lavouras de pastagem estão no ciclo inicial da cultura, apresentando pouca fitomassa para proteção do solo contra a desagregação pelo impacto da gota da chuva, conferindo a superfície uma maior predisposição a ocorrência do processo erosivo.

No entanto, um resultado peculiar pode ser observado na primeira quinzena dos meses de junho e agosto. Nestes dois períodos é possível observar respectivamente 58,3 e 57,9mm de precipitação, e valores elevados de C_{ss} (605 e

886mg L⁻¹). Tais valores foram observados em dois eventos de precipitação muito semelhantes (Tabela 5), que representam eventos de pequena magnitude.

Na primeira quinzena do mês de setembro é observada uma precipitação total elevada (123mm) e uma C_{ss} máxima de 873,8 mg L⁻¹ decorrentes de um evento no dia 10/09/14, para a qual foi registrada uma precipitação total de 63mm, mas com uma intensidade de precipitação baixa (10,8mm hora⁻¹). O valor elevado da C_{ss} também está relacionado com o período de ocorrência, coincidente com o final do ciclo das pastagens de inverno e início do preparo do solo para a semeadura das culturas de verão, tornando o solo mais suscetível a desagregação pelo impacto da gota da chuva, associado a um evento de volume precipitado considerável, situação essa favorável aos processos erosivos. Observa-se que são os eventos de chuva os responsáveis pelos elevados valores de C_{ss} e, por consequência, os maiores volumes de perda de solo, sendo assim de extrema relevância a discretização temporal destes.

4.1.2 Análise na escala de eventos

A análise do comportamento das variáveis hidrossedimentológicas durante os eventos de chuva-vazão, é necessária para uma maior e melhor discretização dos fenômenos envolvidos. Em uma escala mensal ou quinzenal muitas vezes é analisada as variáveis envolvidas com a média, no entanto, os principais eventos de precipitação ocorrem com pouca frequência, ficando estes mascarados aos dados médios de todo o mês. Assim, existem diferentes escalas de análises na qual se caracterizam por possuírem diferentes objetivos (BARROS, 2012).

Durante o período de monitoramento de 6 meses, foram discretizados as variáveis hidrossedimentológicas de 13 eventos de chuva-vazão-sedimentos, sendo o resumo das variáveis descrita na tabela 5. De um modo geral os eventos apresentaram uma ampla gama de magnitudes em períodos diferentes do monitoramento, representando variações de uso do solo e condições de umidade antecedente para diferentes volumes e intensidades de precipitação.

Os eventos apresentaram um volume de precipitação variando de 8,5 a 136,9mm, com uma média de 39,7mm. A duração destes eventos variou de 7,5 a

74,1 horas, sendo uma média de 25,7 horas de duração destes eventos. O evento que apresentou menor duração foi o de maior intensidade ($26,9\text{mm hora}^{-1}$), resultando em uma elevada C_{ss} . A estimativa de escoamento superficial resultou em valores na ordem de 0,7 a 90,68mm, com uma média de 14,79mm. O coeficiente de escoamento (C) relaciona a estimativa do escoamento superficial de um determinado evento com o total precipitado do evento, nos eventos monitorados observa-se um valor mínimo de 5,94 e máximo de 66,3%, com uma média de 23,8%. O coeficiente de escoamento tem relação direta com as características do evento (precipitação total e intensidade) e com as condições do solo, destacando-se a cobertura do solo e a umidade antecedente ao evento. A precipitação acumulada de 5 dias antecedente ao evento (P_5), caracteriza as condições de umidade na qual se encontra o solo, antecedente ao evento. A P_5 variou de 0,3 a 134,7mm, apresentando uma média de 28,4mm.

Tabela 5 – Variáveis hidrossedimentológicas dos 13 eventos monitorados no período de 16/04/14 a 15/10/14 na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Data	Duração (Horas)	Prec. Total (mm)	I ₃₀ (mm h ⁻¹)	P ₅ (mm)	Esc. Sup. (m ³)	Esc. Sup. (mm)	Q-Pico (m ³ /s)	C (%)	Css max (mg L ⁻¹)	PS (t)	PSS (t)	PSA (t)
03/05/2014	7,5	43,1	26,9	4,85	89452,65	5,21	10,19	12,09	1501,34	107,69	93,25	14,44
13/06/2014	11,6	20,9	6,0	0,38	27476,05	1,60	2,52	7,66	605,02	15,11	13,69	1,42
29/06/2014	74,1	136,9	16,4	31,00	1556931,51	90,68	30,14	66,26	1939,08	1335,58	893,55	442,02
04/07/2014	26,8	30,6	25,9	134,67	202222,33	11,78	8,97	38,46	1273,04	118,91	93,343	25,57
06/07/2014	19,9	17,08	6,9	38,15	104296,89	6,07	5,80	35,57	180,31	30,18	16,96	13,21
17/07/2014	32,6	56,3	10,3	10,43	316455,88	18,43	9,61	32,75	724,43	139,87	97,78	42,09
22/07/2014	58,8	78,5	12,4	56,53	568622,26	33,12	18,30	42,19	797,52	283,22	174,92	108,30
30/07/2014	14,3	11,6	5,1	0,30	17598,09	1,02	1,48	8,81	63,79	2,00	1,23	0,76
02/08/2014	10,1	8,5	10,8	17,07	12066,83	0,70	1,43	8,28	236,83	2,89	2,31	0,58
03/08/2014	23,9	14,4	10,8	25,82	30150,05	1,74	1,48	12,11	227,42	5,14	3,76	1,39
11/08/2015	12,7	20,2	12,7	9,35	30841,35	1,80	2,22	8,91	886,09	15,93	14,50	1,43
06/09/2014	15,3	15,3	5,5	24,47	15581,92	0,91	1,19	5,94	159,24	2,32	1,89	0,42
10/09/2014	26,6	63,0	10,8	15,80	330209,66	19,23	12,19	30,51	873,77	188,81	133,46	55,36

Prec. Total: precipitação média total incidente na bacia; I₃₀: intensidade máxima da chuva em 30 minutos; P₅: precipitação total acumulada de 5 dias antecedentes ao evento; Esc. Sup.: escoamento superficial; Q-Pico: vazão de pico; C: coeficiente de escoamento superficial; Css max: concentração máxima de sedimentos em suspensão; PS: produção de sedimentos total; PSS: produção de sedimentos transportado em suspensão; PSA: produção de sedimentos transportado em arraste.

Observa-se na tabela 5 que geralmente os eventos com altos valores de P_5 apresentam elevados coeficientes de escoamento. No entanto, o evento com o maior C (66,3%) não foi o que apresentou a maior P_5 (134,7mm). Cabe salientar que o evento com maior C foi o que apresentou a maior precipitação total (136,9mm). Essas condições, associadas com a precipitação antecedente de 31mm, favoreceram a saturação do solo e por consequência a formação do escoamento superficial. Alencar et al. (2006) analisaram o coeficiente de escoamento superficial (C) em 187 eventos de chuva em uma microbacia no DF e observaram um valor médio de 6,9% e associaram isto as boas condições de infiltração causadas pelas características físicas do solo e a excelente cobertura vegetal. A precipitação antecedente pode ser utilizada e incorporada em modelos de escoamento superficial, melhorando o resultado destes como o observado por Beskow et al. (2009) na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela/MG.

A C_{ss} máxima variou na ordem de 63,8 a 1939mg L⁻¹ para cada evento, de acordo com as características de cada evento e de solo. De acordo com a tabela 5 é possível perceber que os eventos que possuem menor C_{ss} , são os eventos com menor magnitude, apresentando um pequeno volume precipitado, uma baixa intensidade de precipitação ou então características do solo desfavoráveis à geração de escoamento, com um reduzido volume de precipitação antecedente e épocas do ano em que o solo apresenta proteção (das culturas) contra os agentes do processo erosivo.

No entanto, os eventos do dia 13/06/14 e 11/08/14, apresentam peculiaridades. Ambos apresentam características muito semelhantes, mas em períodos distintos do monitoramento. Estes são eventos de menor magnitude, mas ambos possuem C_{ss} máximas elevadas, 605 e 886mg L⁻¹, respectivamente, além de que, as características de solo nestas épocas não possuem agravantes que facilitem a transferência do sedimento até o curso d'água.

O valor máximo de concentração de sedimento em suspensão de 1,9g L⁻¹ foi observado em junho, em um evento que apresentou o maior pico de vazão e também a maior produção total de sedimentos (Tabela 5). As condições antecedentes deste evento também corroboraram para a elevada C_{ss} , visto que, 5 dias antes do evento havia um total de 31 mm acumulados sob a bacia. Tal fato também é característico do evento com a terceira maior C_{ss} (1,3g L⁻¹) sendo que a alta intensidade de

precipitação deste evento também foi um fator importante na alta C_{ss}. De acordo com Seeger et al. (2004), muitas vezes a geração de escoamento está mais relacionada com a umidade do solo do que com as características da precipitação. No entanto, observa-se que a segunda maior C_{ss} registrada durante o período de monitoramento (1,5g L⁻¹), ocorreu em um evento que apresentou 4,85 mm de precipitação antecedente, mas foi o evento que apresentou a maior intensidade de precipitação do período monitorado (26,9mm hora⁻¹).

Na tabela 5 está discretizada a produção de sedimentos total (PS) e as duas formas de transporte estudadas, a produção de sedimentos transportada em suspensão (PSS) e o sedimento transportado em arraste (PSA). O fluxo de sedimento em suspensão foi estimado pela relação entre a turbidez e a C_{ss}, obtida através da equação 14, e a descarga em arraste foi obtida a partir da equação 15 sendo ajustada uma equação potencial em função da vazão, a partir destas equações e com os intervalos de duração dos hidrogramas, foi calculada a produção de sedimentos para o período dos eventos.

A produção total de sedimentos variou de 2,0 a 1.335t nos eventos monitorados. O evento com maior produção de sedimentos foi responsável por 59,4% da produção total de sedimentos de todos os eventos monitorados, caracterizando-se como um evento extremo, na qual as características da precipitação e do solo contribuíram para essa magnitude. Eventos extremos apresentam pequena frequência, no entanto são responsáveis pela elevada produção de sedimentos. Minella et al. (2009), durante um período de monitoramento de 4 anos, na bacia experimental de Arvorezinha observaram que um evento extremo foi responsável pela contribuição de 40% da produção total de sedimentos.

Ao analisar os resultados obtidos, não se pode deixar de notar a elevada carga de sedimento transportada em arraste (Tabela 5). O sedimento transportado em arraste representou de 9 a 43,8% do total de sedimentos transportados no Arroio do Ouro, com uma média de 25,5% para os eventos monitorados. Nota-se que a maior porcentagem de sedimento transportado em arraste em relação ao total, ocorre principalmente em eventos com elevada vazão de pico, pois o sedimento transportado em arraste é altamente dependente da energia do fluxo para ser transportado.

Nas figuras 13, 14, 15 e 16 são apresentados o hietograma o hidrograma e o sedimentograma de todos os eventos monitorados, bem como as coletas de

sedimento em suspensão com o amostrador USDH-59. Na figura 13c está apresentado o evento monitorado mais extremo, com vazão de pico de $30,14\text{m}^3\text{ s}^{-1}$, maior C_{ss} e a maior produção total de sedimentos (1.335t). Observa-se que durante a primeira onda de cheia a C_{ss} apresenta um aumento um pouco mais antecipado em relação a vazão, no entanto, no ramo decrescente observa-se que a C_{ss} não reduz drasticamente, caracterizando que há material disponível ainda para ser transportado. Na segunda onda de cheia observa-se uma similaridade no incremento de vazão e C_{ss} no ramo crescente, no entanto após o pico a C_{ss} reduz rapidamente, isto é característico quando não apresenta mais sedimento disponível para ser transportado (MINELLA et al., 2011).

Os eventos dos dias 13/06/14 e 06/07/14, apresentados na figura 13b e 14a, tem características muito semelhantes, onde se observa um acréscimo mais rápido da C_{ss} no ramo crescente, um pouco antecipado em relação a vazão. No entanto, no ramo decrescente observa-se um decréscimo mais suavizado da C_{ss} em relação a vazão, condição que pode ser atribuída a disponibilidade de sedimentos e a capacidade de transporte do fluxo (MINELLA et al., 2011).

Os dois eventos com maior intensidade de precipitação estão apresentados de forma detalhada nas figuras 13a, e 13d. Estes apresentam uma antecipação do pico de C_{ss} em relação ao de vazão, indicando que a fonte de sedimento está perto da seção de monitoramento e prontamente disponível (Barros, 2012), podendo caracterizar o transporte do sedimento que está depositado na calha do curso d'água (LEFRANÇOIS et al., 2007; MINELLA et al., 2011). No entanto o ramo decrescente da C_{ss} apresenta divergências entre os eventos. O evento do dia 03/05/14 apresenta no ramo decrescente uma redução suave da C_{ss} enquanto que o evento do dia 04/07/14 apresenta uma redução brusca da C_{ss} após ocorrer o pico. Tal fato, provavelmente aponta que neste primeiro evento além do sedimento proveniente da calha fluvial ocorreram outras fontes importantes de sedimento. O inverso ocorre com o segundo, que mesmo possuindo condições de transporte, apresentou limitações na disponibilidade de sedimentos. A maior disponibilidade de sedimentos no evento do dia 03/05/14, pode ser atribuída às condições de cobertura vegetal. Nesta época, coincidente com a semeadura de pastagens de inverno, o solo apresenta uma reduzida cobertura vegetal, já que as plantas estão em fase inicial de desenvolvimento

e, além disto, as práticas agrícolas adotadas corroboram para ampliar a predisposição á erosão.

A precipitação antecedente é outra condição importante que distingue os dois eventos. Na comparação entre os dois eventos, o primeiro apresenta uma P_5 de 4,85mm e o segundo de 134,67mm, em virtude de um evento ocorrido nos dias 29 e 30/06/14. O efeito da precipitação antecedente é observado no coeficiente de escoamento (C) que, mesmo o primeiro evento apresentando uma precipitação maior (43,1mm) com uma duração bem menor (7,5horas), foi observado um C de três vezes maior para o segundo evento (Tabela 5). Sequinatto (2007) observou o maior escoamento superficial e produção de sedimento no evento com maior umidade antecedente, quando comparado dois eventos consecutivos. No entanto, como as condições de uso e o manejo do solo são variáveis no tempo, observa-se diferentes comportamento quando submetidos a eventos com características semelhantes.

De todos os eventos monitorados, cinco destes apresentam características muito semelhantes, tanto de precipitação quanto na resposta de vazão e C_{ss} ao referido evento (Tabela 5 e Figuras 14d e 15a, b, c, d). Estes eventos são de pequena magnitude, baixa intensidade de precipitação, produzindo vazões de pico baixas e coeficientes de escoamento de 5,9 a 12,1%. Quanto às características do hidrograma e sedimentograma se observa que nestes eventos, o pico de C_{ss} ocorre depois da vazão máxima, caracterizando a chegada de sedimentos mais distantes, oriundos, por exemplo, da erosão de áreas vertentes (MINELLA et al., 2011; LEFRANÇOIS et al., 2007) ou processos com dinâmica mais lenta do que o aumento da descarga líquida (LEFRANÇOIS et al., 2007). Klein (1984) destaca que como a velocidade do fluxo nas áreas vertentes é bem menor que no canal fluvial, quando o sedimento é proveniente das encostas ou das áreas mais altas (em bacias maiores) ocorre o retardo do pico da descarga líquida em relação a C_{ss}.

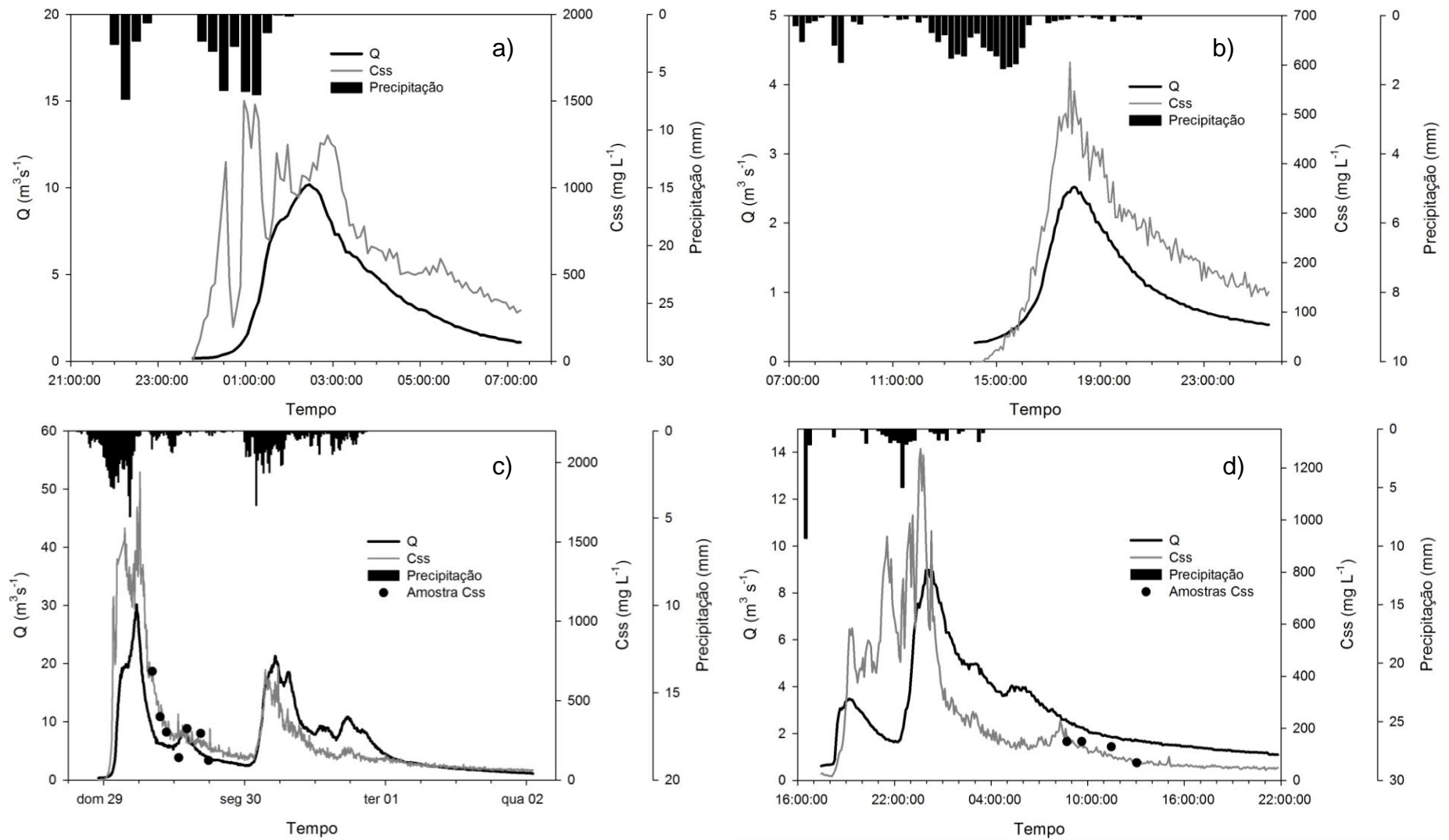


Figura 13 – Hietograma, hidrograma e sedimentograma dos eventos ocorridos nos dias: 03/05/2014 (a), 13/06/14 (b), 29/06/14 (c) e 04/07/2014 (d), para a bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

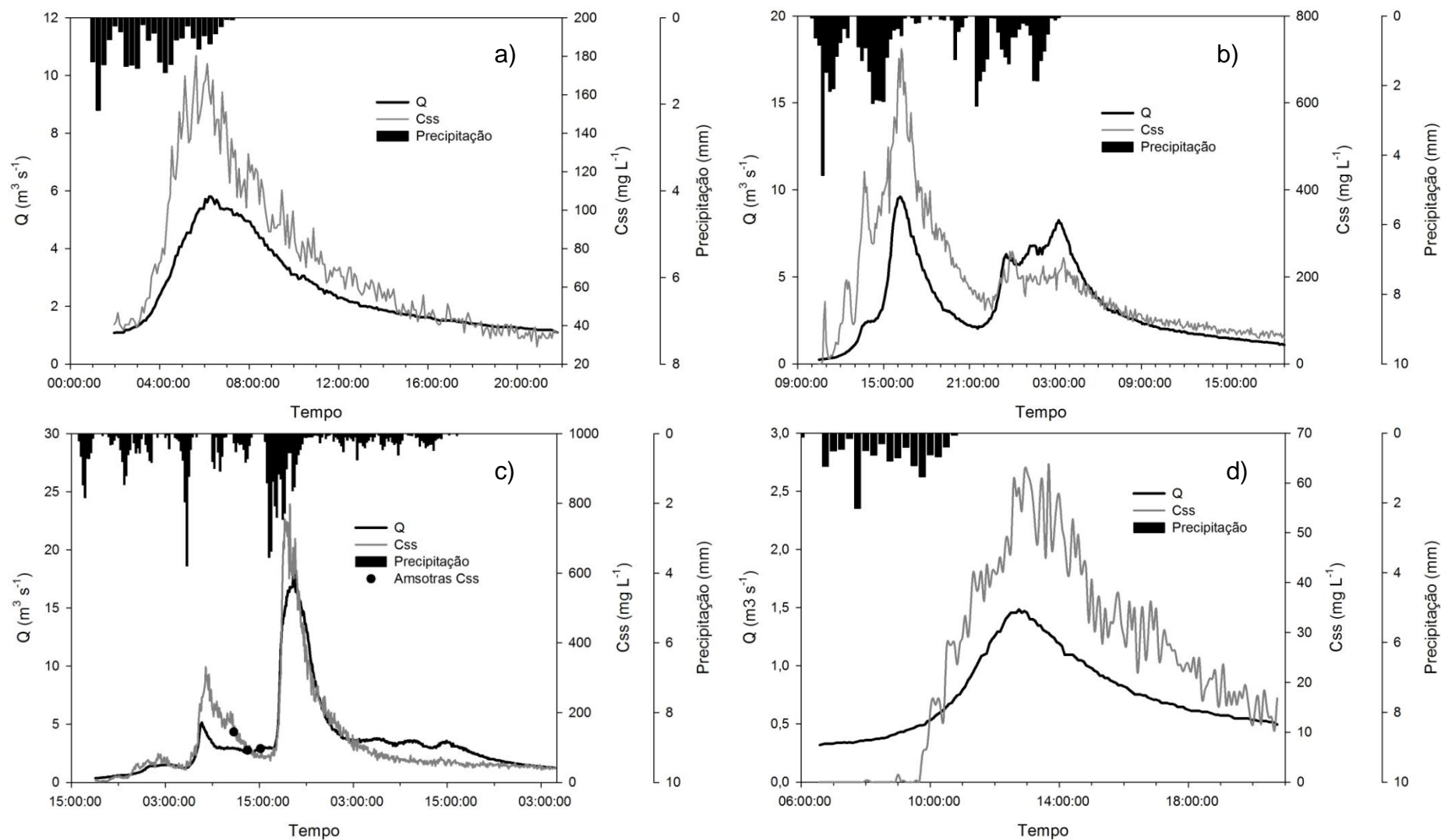


Figura 14 – Hietograma, hidrograma e sedimentograma dos eventos ocorridos nos dias: 06/07/2014 (a), 17/07/14 (b), 22/07/14 (c) e 30/07/2014 (d), para a bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

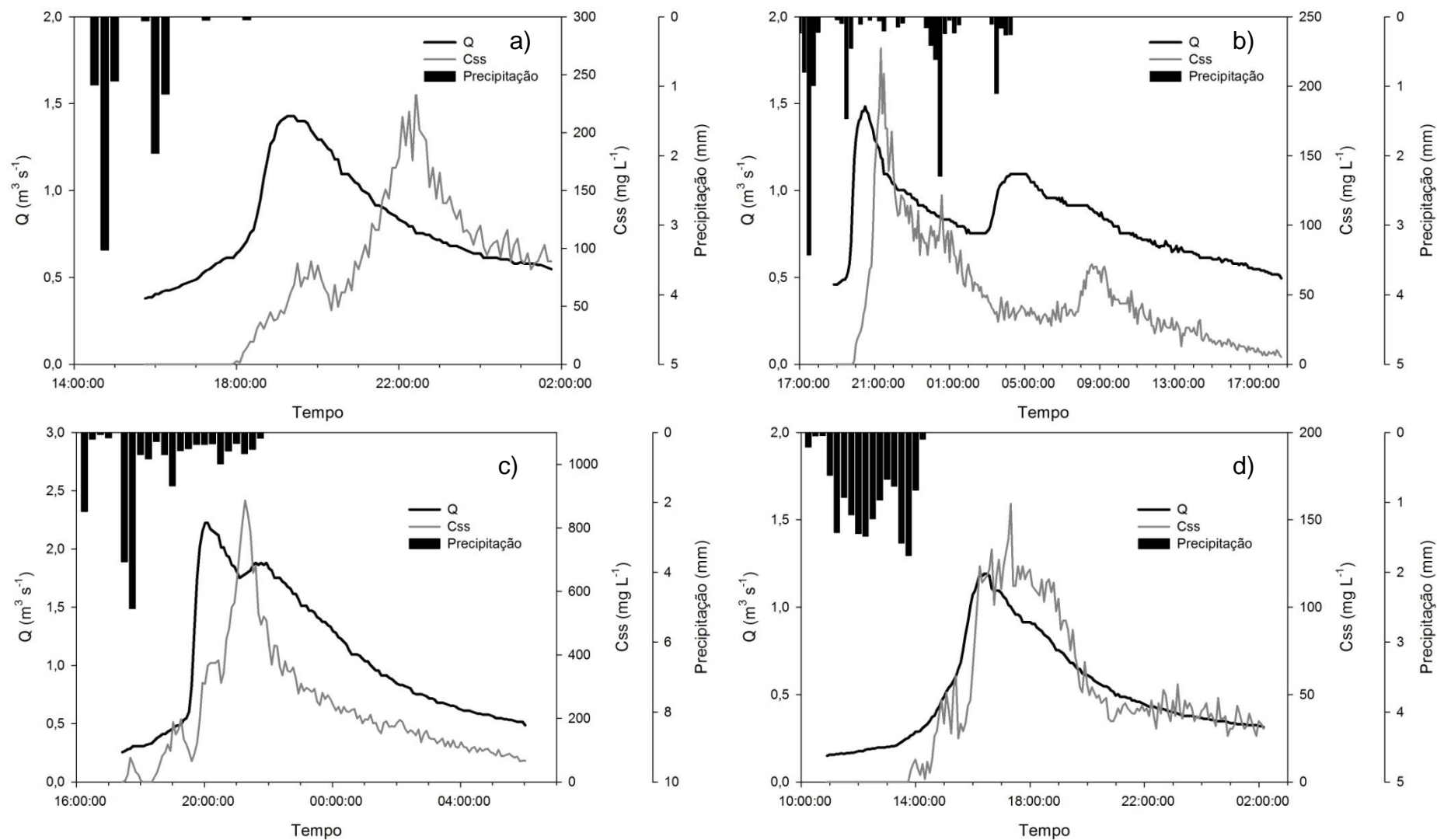


Figura 15 – Hietograma, hidrograma e sedimentograma dos eventos ocorridos nos dias: 02/08/2014 (a), 03/08/14 (b), 11/08/14 (c) e 06/09/2014, para a bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

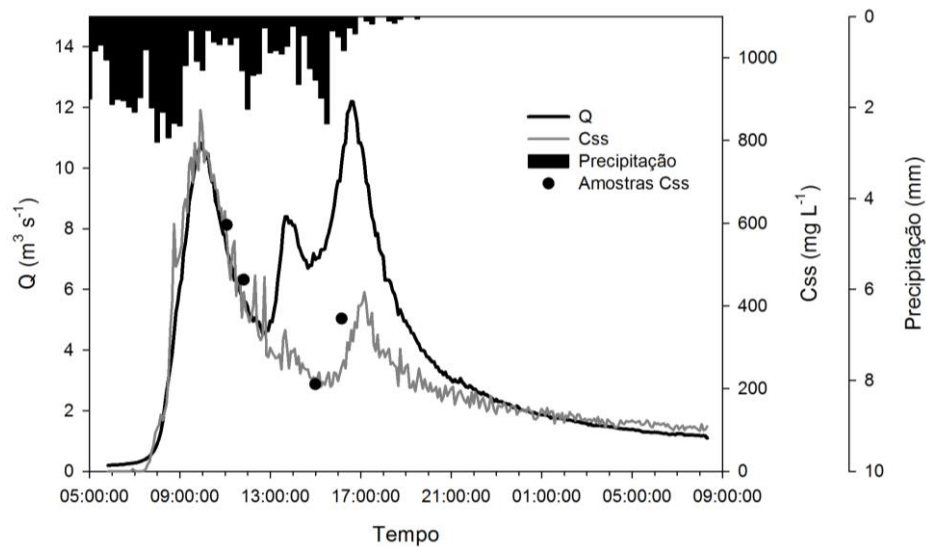


Figura 16 – Hietograma, hidrograma e sedimentograma do evento ocorrido no dia 10/09/2014, para a bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

4.1.2.1 Efeito da histerese entre a C_{ss} e a vazão

A partir do monitoramento dos eventos de precipitação foi realizada a análise da histerese entre a C_{ss} e a vazão na forma qualitativa, de acordo com o sentido do laço e na forma quantitativa, com o uso do índice de histerese (IH). De acordo com Lefrançois et al. (2007) um laço no sentido horário é característico da remoção do sedimento depositado no canal, apresentando uma limitação de disponibilidade durante o evento. Já quando o pico de vazão antecede o de C_{ss} gera-se uma curva anti-horária, caracterizando a chegada de partículas mais distantes, como das bacias vertentes (LEFRANÇOIS et al., 2007; MINELLA et al., 2011).

Trabalhos em pequenas bacias hidrográficas no Rio Grande do Sul observaram uma predominância do laço da histerese em sentido horário, como em uma bacia experimental de Arvorezinha (BARROS, 2012; MINELLA et al., 2011) e em uma bacia de Eldorado do Sul (RODRIGUES et al., 2014). No entanto, na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro não se observa uma predominância no sentido do laço da histerese, sendo dos treze eventos, sete possuem sentido horário, cinco sentido anti-horário e um evento com formato de oito (Figura 17 e 18). Na tabela 6 estão descritos, na forma quantitativa, o laço da histerese (pelo índice de histerese) dos eventos monitorados e alguns parâmetros hidrológicos. O IH apresentou uma variação de -4,38 a 2,27, com

uma média de -0,49, indicando que o pico de vazão antecede o pico do sedimentograma, mesmo que 7 eventos apresentem sentido horário do laço da histerese.

Nota-se nas figuras 13, 14 e 16, com base na tabela 6, que os eventos com histerese no sentido horário na bacia do Arroio do Ouro, são geralmente eventos com maior magnitude, como os eventos ocorridos nos dias 03/05/14, 29/06/14, 17/07/14 e 22/07/14. Outra característica observada destes eventos é a elevada produção total de sedimentos, variando de 30,18 a 1.335,58 toneladas por evento. Isto caracteriza que, mesmo quando os eventos apresentavam uma antecipação do pico da C_{ss} em relação a vazão, a C_{ss} não foi reduzida drasticamente no ramo descendente. Assim, nestes eventos, observa-se que não ocorrem limitações quanto a disponibilidade de material, podendo caracterizar que novas fontes de sedimentos mais distantes são incorporadas, durante o evento, garantindo a disponibilidade de sedimentos para ser transportado.

Os dados do IH apresentados na tabela 6, salientam este argumento, visto que os eventos com laço no sentido horário apresentam valores baixos de IH, apontando que para a vazão média os valores de C_{ss} no ramo crescente e decrescente são muito próximos. Apenas o evento do dia 04/07/14 distingue-se dos demais, apresentando uma redução brusca da C_{ss} no ramo decrescente (Figura 13d), com um IH de 2,27. Barros (2012) também observou na bacia de Arvorezinha/RS um aumento do IH em alguns eventos em sequência, destacando a exaustão do aporte de sedimentos como a principal causa. Minella et al. (2011) utilizaram o IH para inferir que os usos de práticas conservacionistas reduziram a mobilização e o aporte de sedimentos na calha fluvial, no qual os autores observaram um aumento do IH com o manejo conservacionista, apresentando uma tendência de redução da C_{ss} no ramo descendente do sedimentograma.

O evento do dia 13/06/14 é o único caracterizado pelo formato de oito do laço da histerese. No entanto, apresenta características muito semelhantes aos eventos com sentido anti-horário, tanto que o IH possui valor negativo (-0,07). Tais semelhanças, com o pico de vazão antecedendo o de C_{ss} foram observadas por Barros (2012) e Minella et al. (2011), podendo ser atribuído a novas fontes de sedimento contribuindo para o fornecimento de sedimentos.

A presença de laços com sentido anti-horário é geralmente característico de eventos com elevadas precipitações, apresentando uma área de contribuição de sedimentos muito grande, com solos próximos a saturação, em toda a bacia (SEEGGER et al., 2004). No entanto, os eventos monitorados na Bacia do Arroio do Ouro diferiram deste comportamento. Apresentando pequena magnitude, com volumes de precipitação reduzidos, de 8,5 a 20,2mm, com baixos coeficientes de escoamento e de intensidade de precipitação. Com isso a importância destes eventos na produção total de sedimentos é foi reduzida, correspondendo a 1,26% da produção total de sedimentos dos eventos monitorados.

Características semelhante para os eventos com laço anti-horário foram observados por Ziegler et al. (2014) em uma bacia no norte da Tailândia com 74km². Os autores descrevem que histerese anti-horária geralmente ocorre em pequenos e médios eventos, enquanto que grandes eventos tendem a produzir e histereses no sentido horário e formas complexas. Jansson (2002) analisando os sentidos dos laços da histerese com eventos de diferentes magnitudes na Costa Rica observou que eventos de grande magnitude com sentido horário acabam realizando o transporte do sedimento que estava na calha fluvial, já os eventos menores com laços no sentido anti-horário são os responsáveis pela deposição do material, que vai ser transportado no próximo evento, de maior magnitude.

Assim, uma possível resposta as características dos eventos aqui observados, que apresentam o sentido anti-horário do laço da histerese, está na análise da sequência dos eventos. Os cinco eventos com sentido anti-horários estão dispostos em sequência, sendo o primeiro no dia 30/07/14 e o último dia 06/09/14. Pode-se observar na tabela 5 um resumo das variáveis hidrossedimentológicas. O evento anterior ao dia 30/07/14 é caracterizado por apresentar sentido horário do laço da histerese, de grandes proporções, com precipitação total de 78,5mm, baixa intensidade ($I_{30} = 12,4 \text{ mm h}^{-1}$), solo com elevada umidade (P_5 de 56,5mm), resultando em uma vazão de pico de $18,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, coeficiente de escoamento de 42,19% e produção estimada de sedimentos elevada (283,22t). Com um IH de 0,13 (Tabela 6), observa-se que não ocorreu limitações quanto a disponibilidade de sedimentos, provavelmente por causa da incorporação do sedimento proveniente de outras áreas da bacia. Depois deste evento observam-se os cinco eventos de menor magnitude caracterizados pela histerese no sentido anti-horário. De acordo com Jansson (2002),

estes são os responsáveis pela deposição do sedimento na calha fluvial. Assim o sedimento depositado nos eventos anteriores foi transportado por um evento de maior dimensão (dia 10/09/14), apresentando histerese horária e um IH de 0,13.

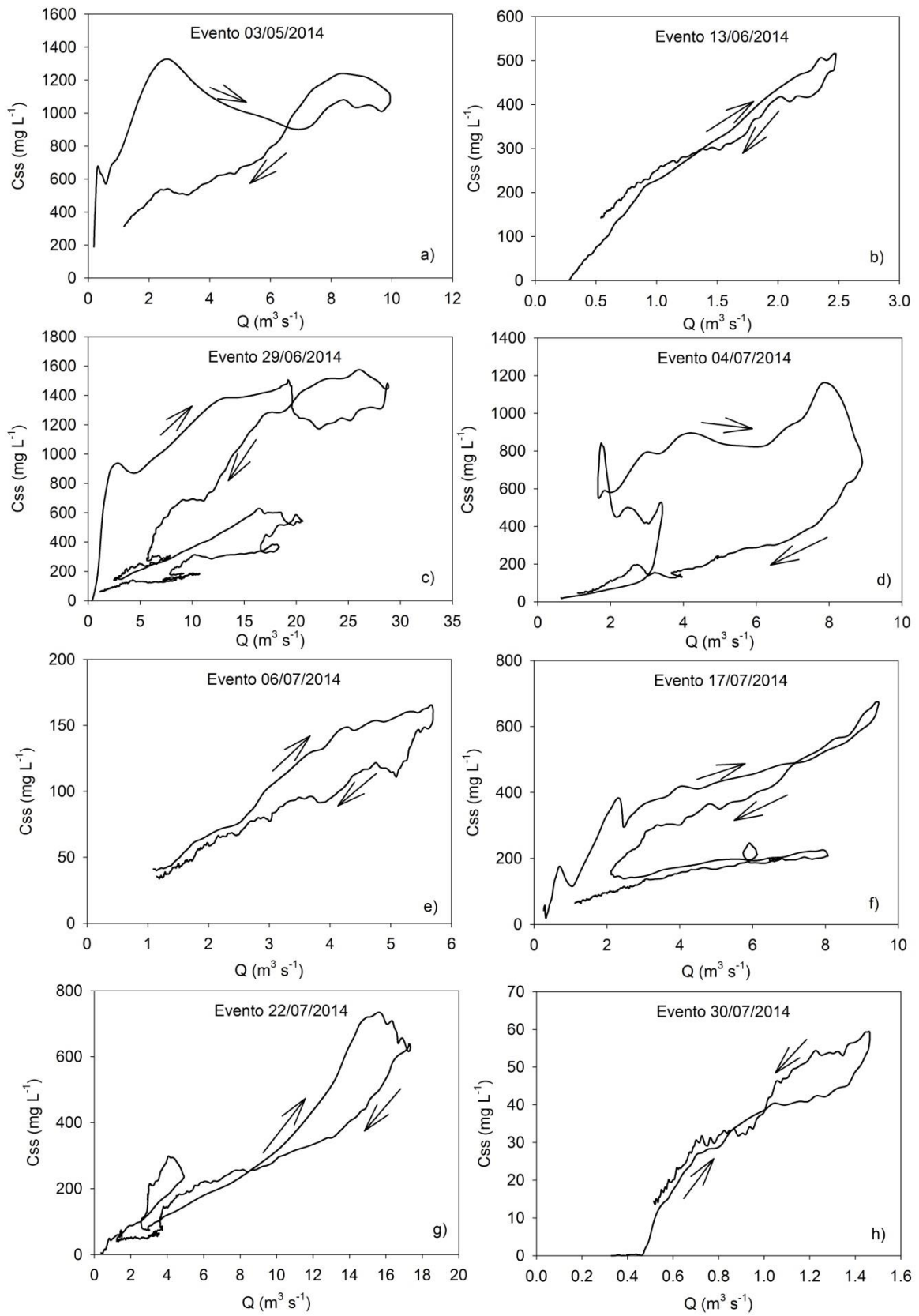


Figura 17 – Curvas de histerese no sentido horário (a, c, d, e, f, g), na forma de oito (b) e anti-horário (h), para os eventos ocorridos na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

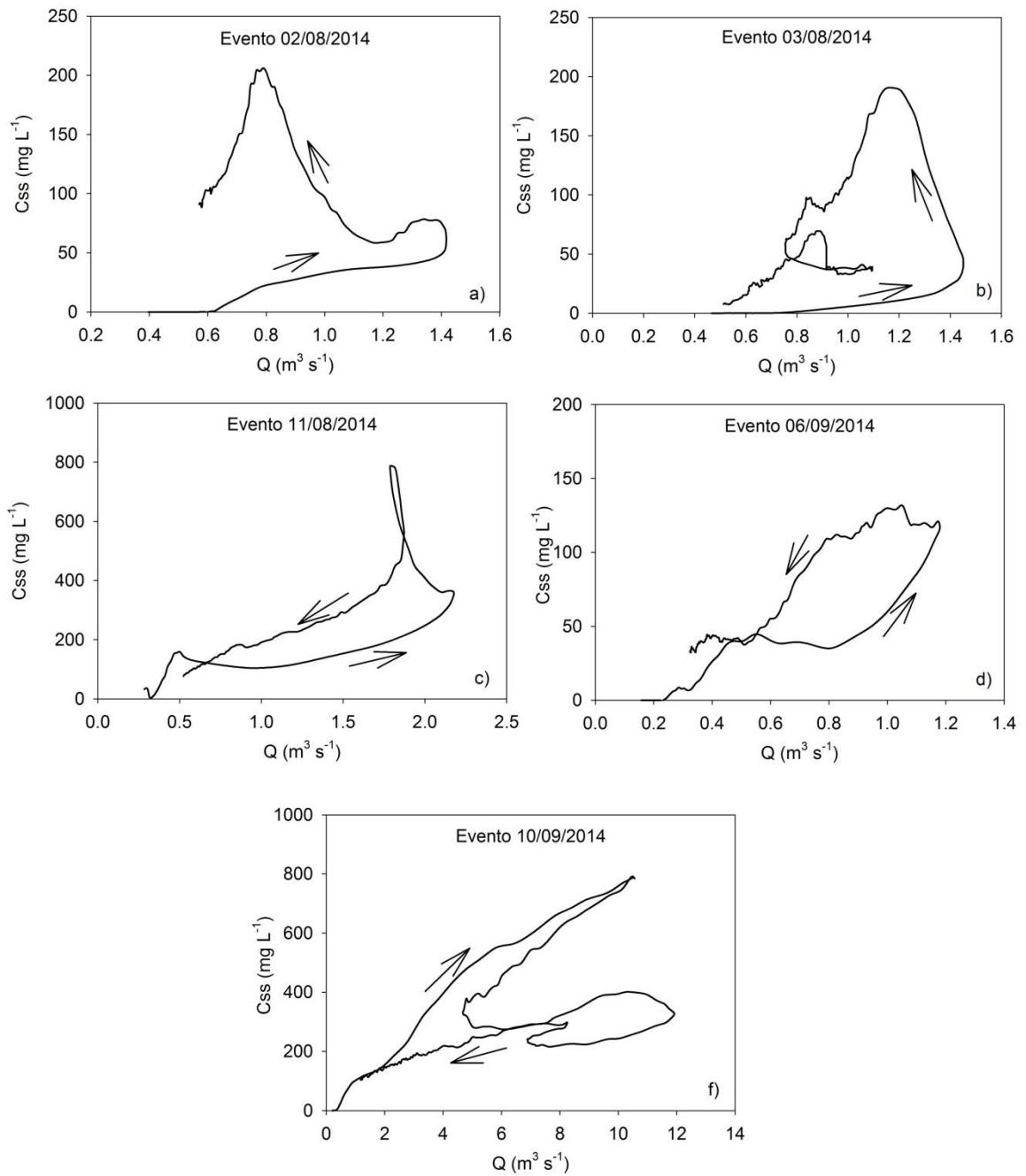


Figura 18 – Curvas de histerese no sentido anti-horário (a, b, c, d) e horário (e), para os eventos ocorridos na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Tabela 6 – Variáveis hidrossedimentológicas e índice de histerese para os eventos monitorados na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Data	Duração (Horas)	Prec. Total (mm)	Q _{max} (m ³ s ⁻¹)	Q _{min} (m ³ s ⁻¹)	Q _{cen} (m ³ s ⁻¹)	Css RC (mg L ⁻¹)	Css RD (mg L ⁻¹)	IH	Histerese
03/05/2014	7,5	43,1	10,19	0,17	5,18	927,761	622,496	0,49	H
13/06/2014	11,6	20,9	2,52	0,27	1,40	285,982	306,625	-0,07	8
29/06/2014	74,1	136,9	30,14	0,35	15,25	1400,595	1153,876	0,21	H
04/07/2014	26,8	30,6	8,97	0,61	4,79	743,360	227,417	2,27	H
06/07/2014	19,9	17,08	5,80	1,08	3,44	117,840	97,696	0,21	H
17/07/2014	32,6	56,3	9,61	0,25	4,93	498,329	371,920	0,34	H
22/07/2014	58,8	78,5	18,30	2,93	10,62	283,441	251,206	0,13	H
30/07/2014	14,3	11,6	1,48	0,32	0,90	34,821	36,267	-0,04	AH
02/08/2014	10,1	8,5	1,43	0,38	0,90	36,267	141,024	-2,89	AH
03/08/2014	23,9	14,4	1,48	1,18	1,33	18,157	97,696	-4,38	AH
11/08/2015	12,7	20,2	2,22	0,26	1,24	88,891	236,827	-1,66	AH
06/09/2014	15,3	15,3	1,20	0,15	0,67	33,385	71,937	-1,15	AH
10/09/2014	26,6	63	12,19	0,19	6,19	524,160	469,940	0,12	H

Prec. Total: volume total de precipitação do evento; Q_{max}: vazão máxima do evento; Q_{min}: vazão inicial mínima do evento; Q_{cen}: vazão média calculada para o evento; Css RC: concentração de sedimentos em suspensão para a Q_{cen} no ramo crescente; Css RD: concentração de sedimentos em suspensão para a Q_{cen} no ramo decrescente; IH: índice de histerese calculado para o evento; Histerese: H - sentido horário, AH – sentido anti-horário e 8: formato de oito.

4.1.3 Relação entre a C_{ss} e a Turbidez

Durante o período de monitoramento que transcorreu de abril a outubro de 2014, foi possível relacionar a turbidez com 19 amostras de sedimento em suspensão, em um intervalo de 60,4 a 684,6 mg L⁻¹ (Figura 19). Cabe salientar que foram coletadas um número maior de amostras durante o período do estudo, no entanto, devido a falhas observadas no funcionamento do turbidímetro não foi possível estabelecer uma curva de ajuste. Na figura 19 também é possível observar que a função ajustada apresenta um bom coeficiente de determinação ($R^2=0,90$), indicando que a curva ajustada apresenta comportamento similar aos dados observados.

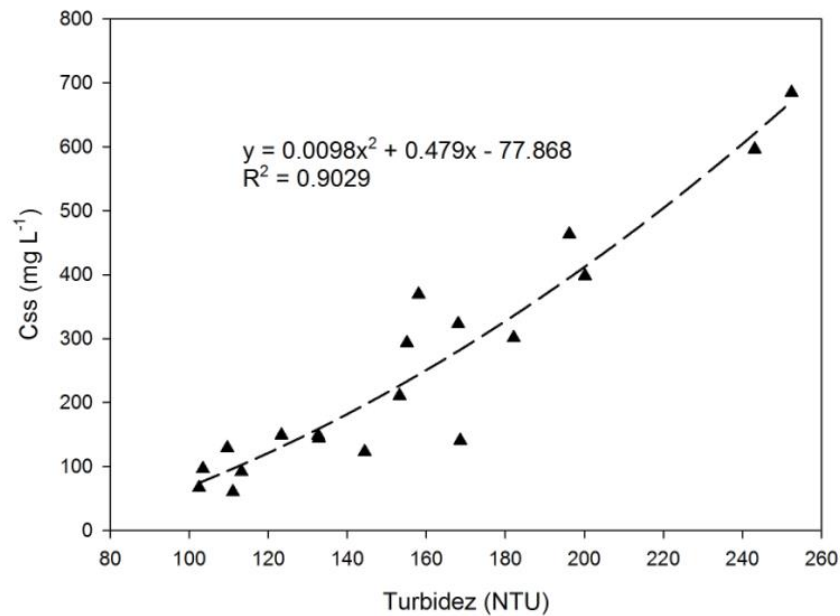


Figura 19 – Curva de regressão entre a turbidez e a C_{ss}.

O intervalo na qual foi coletado as amostras de C_{ss} é característico do comportamento do sedimento em suspensão da bacia. Dos 13 eventos monitorados neste estudo, apenas três apresentaram C_{ss} muito superior a faixa amostrada. A equação 14 expressa o ajuste entre a turbidez e a C_{ss}, e o melhor ajuste foi obtido por uma regressão polinomial.

$$C_{ss} = 0,0098 \times \text{Turb}^2 + 0,479 \times \text{Turb} - 77,868 \quad (14)$$

Onde:

Css= concentração de sedimentos em suspensão (mg L^{-1});

Turb = Turbidez (NTU).

A equação ajustada em função da turbidez representa adequadamente o comportamento da Css durante os eventos de chuva, no entanto esta apresenta significativas limitações para estimar a Css em períodos sem chuva, visto que a turbidez nestes períodos é bem inferior ao intervalo amostrado. No entanto isto não deve ser um problema na estimativa da produção total de sedimentos, visto que na maioria dos rios 70 a 90% da descarga de sedimentos em suspensão ocorre durante eventos de chuva (WMO, 2003).

O ajuste curvilíneo entre a turbidez e a Css pode estar associado com a variação do tamanho das partículas, pois, de acordo com as observações de Merten et al. (2014) o turbidímetro é pouco sensível quanto maior a presença de partículas de maior diâmetro, como a areia, observando um decréscimo da turbidez para uma mesma Css quando se adiciona uma maior quantidade de partículas grosseiras a amostra. Durante as medições de Css é possível observar a presença nas amostras de sedimentos mais grosseiros, quando o escoamento apresenta energia suficiente para suspender o material disposto no leito ou sendo transportado em arraste. Quando o material mais grosseiro está presente em amostras em suspensão, uma pequena variação da turbidez pode corresponder a uma grande variação de Css. Old et al. (2003) observou mesmas condições e também obteve um ajuste curvilíneo entre a turbidez e a Css em amostras coletadas em uma bacia na Inglaterra, atribuindo essa variação ao tamanho das partículas transportadas em suspensão.

4.1.4 Relação entre a vazão e a descarga em arraste

Para estimar a descarga de sedimentos transportados em arraste (Q_{sa}) foi ajustada uma equação potencial, devido ao seu bom desempenho na estimativa da descarga em arraste. Para estabelecer esta relação foram coletadas 23 amostras de sedimento e relacionadas com a vazão. As amostras de sedimento em arraste foram

coletas com vazões entre $1,6$ e $13,3\text{m}^3\text{s}^{-1}$ resultando em um intervalo de descarga em arraste na ordem de $0,05$ a $3,1\text{Kg s}^{-1}$ (Figura 20). Assim foi possível observar que o sedimento de arraste é altamente dependente das condições do fluxo, sendo que, para vazões inferiores a $1,6\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ a descarga em arraste foi muito reduzida e, no entanto, quando se aumenta a energia do fluxo, este transporte apresenta um acréscimo bastante significativo e adquire grande importância. Merten e Minella (2014) também observaram para uma bacia experimental de $1,2\text{Km}^2$ que, a partir de um determinado fluxo ($0,8\text{m}^3\text{ s}^{-1}$), ocorre um aumento exponencial na descarga em arraste.

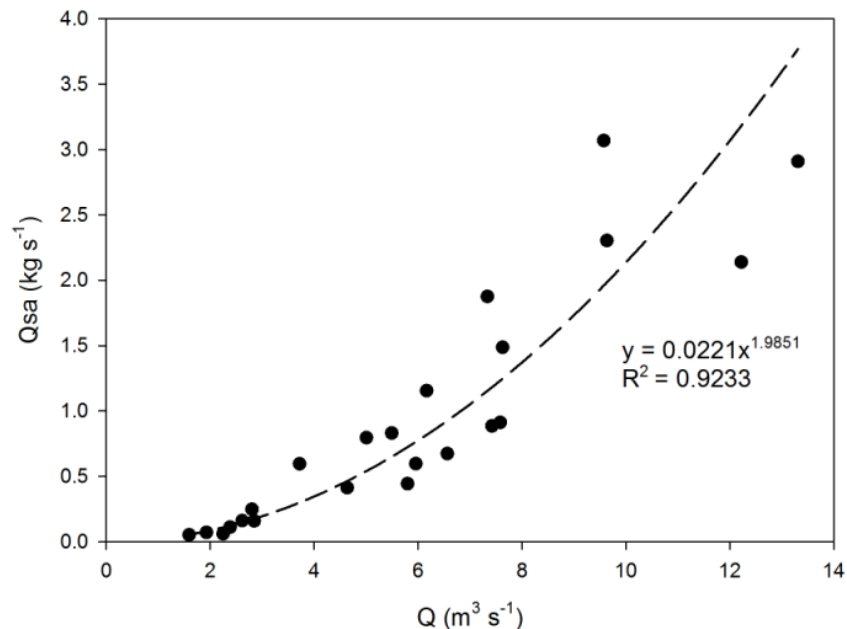


Figura 20 – Curva de regressão entre vazão e a descarga de arraste.

A equação 15 expressa o ajuste entre a Q_{sa} e a vazão. Nessa função potencial o expoente indica a inclinação da curva sendo que, curvas com maior inclinação apresentam um maior incremento no aumento na descarga de arraste, já o coeficiente a representa a magnitude do transporte (BUNTE et al, 2006).

$$Q_{sa} = 0,0221 \times Q^{1,9851} \quad (15)$$

Onde:

Q_{sa} = descarga sólida transportada em arraste (Kg s^{-1});

Q = vazão ($\text{m}^3\text{ s}^{-1}$).

De acordo com a equação 15 podemos observar um expoente de 1,98, que representa um incremento sutil na descarga de arraste com aumento na vazão. O valor do expoente está muitas vezes relacionado com a granulometria do sedimento. Sedimentos com características granulométricas mais grosseiras apresentam curvas com maior inclinação, como os encontrados por Bunte e Abt (2003), no qual observaram expoentes entre 8 e 16, em rios que apresentam transporte de cascalho.

Outra questão relacionada com a inclinação da curva é a escolha do tipo de amostrador a ser utilizado, o amostrador Helley-Smith, utilizado neste estudo não representa de maneira adequada o transporte de sedimentos grosseiro com 32-64mm (BUNTE et al, 2008). Assim, os mesmos autores observaram que quando este amostrador é empregado para estimar o transporte em rios com leito de cascalho, reproduz curvas menos acentuadas, com expoentes entre 2 e 4. No entanto, no Arroio do Ouro, é perceptível o transporte de sedimento arenoso com diâmetro menor que 32mm, podendo esse tipo de amostrador, Helley-Smith, ser empregado para estimar o transporte de sedimento em arraste. É possível observar na figura 20 que o ajuste potencial apresentou um elevado coeficiente de determinação ($R^2=0,92$), mostrando que a curva ajustada representa adequadamente a tendência do transporte de sedimento em arraste no Arroio do Ouro. Outros trabalhos obtiveram ajustes de qualidade inferior quando estimado o transporte em arraste em rios com leito arenoso, caso de Erskine e Saynor (2013) em uma bacia na Austrália e Claude et al, (2012) em um grande rio na França. Já Bunte et al (2008) e Bunte e Abt (2003) observaram ajustes melhores para rios com fundo de cascalho quando foram utilizados amostradores com bocais maiores e com um período de amostragem mais longo.

4.1.5 Relação entre a produção de sedimentos e variáveis hidrológicas

Como já discutido, o comportamento hidrossedimentológico é extremamente variável para cada evento de precipitação, representando a integração dos fatores inerentes da precipitação, das características do solo, uso e manejo, umidade antecedente e as características morfológicas da bacia. Deste modo, algumas variáveis hidrológicas podem ser utilizadas para estimar a produção de sedimentos

de uma bacia. Podendo ser empregadas para o preenchimento de falhas em períodos não monitorados, na gestão de uma bacia, previsão de cenários (RODRIGUES, 2011).

Na figura 21 pode-se observar a relação entre três variáveis hidrológicas a saber: vazão de pico, escoamento superficial e o produto destes dois, na estimativa da produção total de sedimentos. Percebe-se que todos apresentam uma forte correlação com a produção de sedimentos, podendo ser um indicativo de uso na estimativa da produção de sedimentos total de um evento não monitorado. Pode-se observar que o melhor ajuste foi observado com o produto da vazão de pico e o escoamento. Rodrigues et al. (2014) também observaram a melhor correlação com o produto destas duas variáveis em uma pequena bacia em Eldorado do Sul/RS, indicando que a maior transferência de sedimentos ocorre durante as cheias do canal. Para Minella (2004), Zabaleta et al. (2007) observaram uma forte correlação entre a produção de sedimentos e a vazão de pico e escoamento superficial em três bacias na Espanha. Já Duvert et al. (2012) registraram que a vazão máxima é a variável melhor relacionada para 50% das 8 bacias estudadas. Assim destaca-se que na falta de dados ou em momentos que não foi possível realizar o monitoramento da produção de sedimentos, pode-se utilizar das variáveis hidrológicas destacando-se a vazão máxima, escoamento superficial e o produto destas na estimativa da produção de sedimentos, desde que mais eventos sejam monitorados a fim de observar possíveis modificações no comportamento. Para Minella (2004), esta informação apresenta uma grande importância prática para a avaliação do impacto de um evento sobre a bacia hidrográfica.

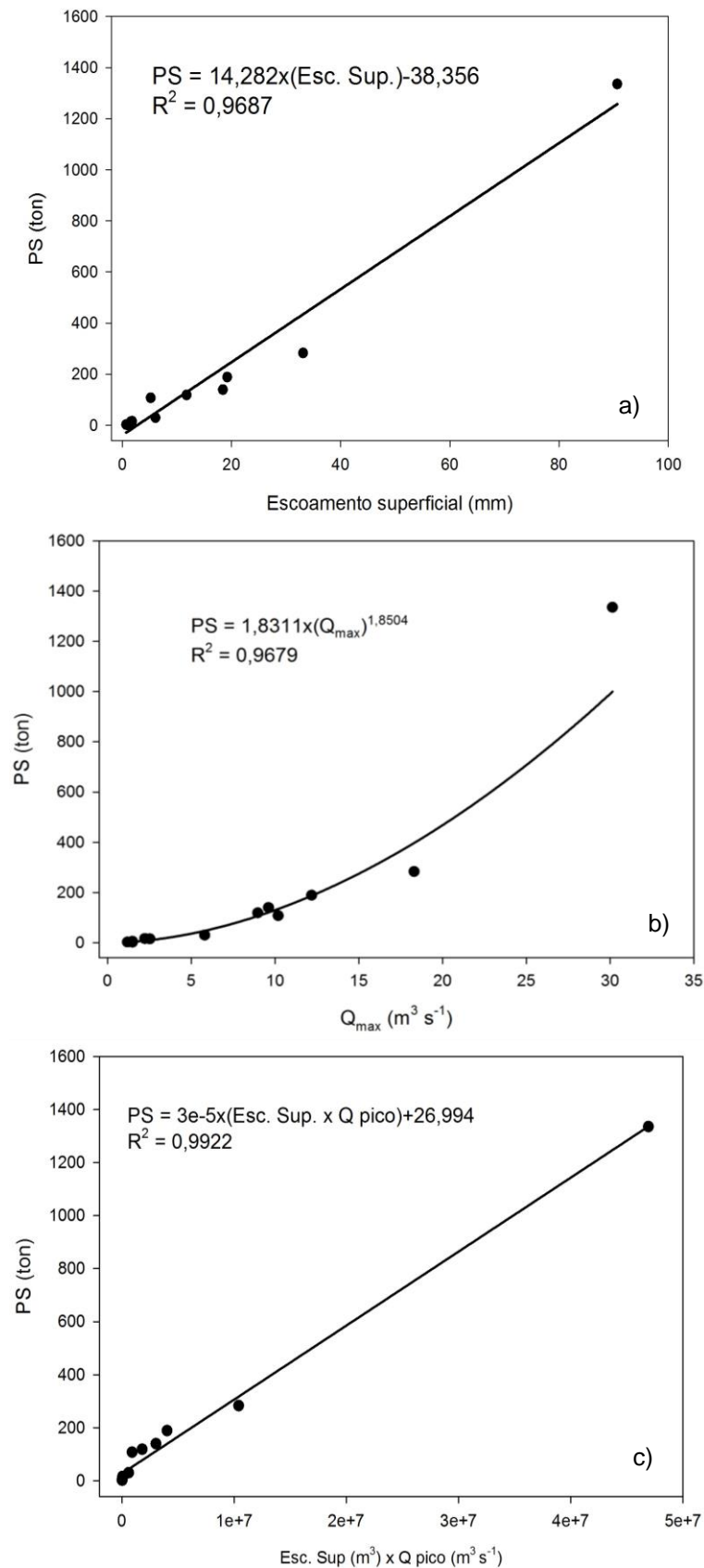


Figura 21 – Relação entre as variáveis hidrológicas: Escoamento superficial (a), vazão máxima (b) e o produto destas duas (c) e a produção total de sedimentos (PS), para os eventos ocorridos na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

5 Conclusão

Nas condições do estudo se observa uma elevada carga de sedimentos transportados em arraste, representando em média um montante de 25% da produção total de sedimentos para os eventos monitorados. Tais informações salientam a importância da quantificação do sedimento transportado em arraste para as condições da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro e provavelmente para outras bacias do Escudo Sul-Rio-Grandense, ao contrário da maioria dos dados de projetos os quais empregam uma determinada proporção em relação ao total de sedimentos transportados em suspensão.

Analisando o comportamento do sedimento em suspensão para 13 eventos monitorados com diferentes magnitudes, ao relacionar o comportamento da C_{ss} com a vazão, a partir das curvas de histerese, observa-se que não ocorreu um predomínio no sentido do laço de histerese, observando-se eventos com sentido horário e anti-horário. Os eventos com histerese anti-horária são de pequena magnitude. Nestes eventos poderá ocorrer a deposição de sedimento na calha fluvial, e não o transporte de sedimentos proveniente de áreas mais distantes.

A bacia hidrográfica do Arroio do Ouro tem monitoramento contínuo recente, não mais de dois anos, sendo necessário um período maior, capaz de capturar um número maior de eventos, significativo para expressar e analisar amplamente, integrando os resultados das variáveis hidrossedimentológicas medidas, promovendo melhoria das técnicas que dão suporte aos estudos das relações dos eventos de chuva-vazão-sedimentos, suportadas pelas características desta bacia.

Referências

ALENCAR, D. B. S.; SILVA, C. L.; OLIVEIRA, C. A. S. Influência da precipitação no escoamento superficial em uma microbacia hidrográfica do Distrito Federal. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 103-112, 2006.

ANGILLIERI, M. Y. E. Morphometric analysis of Colanguil river basin and flash flood hazard, San Juan, Argentina. **Environmental Geology**, v. 55, p. 107-111, 2008.

ASSELMAN, N. E. M. Fitting and interpretation of sediment rating curves. **Journal of Hydrology**, v. 234, p. 228-248, 2000.

BARROS, Claudia Alessandra Peixoto de. **Comportamento hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica rural utilizando técnicas de monitoramento e modelagem**. 2012. 179 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

BARRY, J. J.; BUFFINGTON, J. M.; KING, J. G. A general power equation for predicting bed load transport rates in gravel bed rivers. **Water Resources Research**, v. 40, p. 1-22, 2004.

BATALLA, R. J. Evaluating bed-material transport equations using field measurements in a sandy gravel-bed stream, arbuties river, ne Spain. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 22, p. 121-130, 1997.

BELLINASSO, Tarcisio. Barcellos. **Monitoramento hidrossedimentométrico e avaliação da produção de sedimentos em eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica urbana de encosta**. 2002. 300f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

BERTOSSI, A. P. A.; KLIPPEL, V. H.; PELUZIO, T. M. O.; MENEZES, J. P. C.; CECÍLIO, R. A. Análise morfométrica da sub-bacia do córrego Horizonte, Alegres, utilizando o sistema de informação geográfica (SIG). **Nucleus**, v. 8, n. 2, p. 209-218, 2011.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; COELHO, G.; SILVA, A. M.; VIOLA, M. R. Estimativa do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica com base em modelagem dinâmica e distribuída. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 33, p. 169-178, 2009.

BUNTE, K.; ABT, S. R. Sampler size and sampling time affect bedload transport rates and particle sizes measured with bed load traps in gravel-bed streams. In: **EROSION AND SEDIMENT TRANSPORT MEASUREMENT IN RIVERS: TECHNOLOGICAL AND METHODOLOGICAL ADVANCE**, 2002. **Anais... IAHS**, v. 283, 2003. p. 126-133.

BUNTE, K.; ABT, S. R.; POTYONDY, J. P.; RYAN, S. E. Measurement of coarse gravel and cobble transport using portable bedload traps. **Journal of hydraulic engineering**, v. 130, p. 879-893, 2004.

BUNTE, K.; ABT, S. R.; POTYONDY, J. P.; SWINGLE, K. W. A comparison of coarse bedload transport measured with bedload traps and Helley-Smith Samplers. **Geodinamica Acta**, v. 21, n.1, p. 53-66, 2008.

BUNTE, K.; ABT, S. R.; SWINGLE, K. W. Predictability of bedload rating and flow competence curves from bed armoring, stream width and basin area. In: **PROCEEDINGS OF THE EIGHTH FEDERAL INTERAGENCY SEDIMENTATION CONFERENCE**, **Anais...** Reno, NV, USA, 2006. p. 98-106.

BUNTE, K.; MACDONALD, L.H. **Scale considerations and the detectability of sedimentary cumulative watershed effects**. Research Triangle Park, NC: NCASI, 1999. 327 p.

CARVALHO, D. F. de; CRUZ, E. S. da; 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. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 13, n. 1, p. 3–9, 2009.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 599 p.

CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JR., N. O.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. **Guia de Práticas Sedimentométricas**. Brasília, Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000. 116 p.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num latossolo roxo

distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 22, p. 527-538, 1998.

CHEN, L.; SCHUMER, R.; KNUST, A.; FORSEE, W. Impact of temporal resolution of flow-duration curve on sediment load estimation. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 48, n.1, p. 145–155, 2011.

CLAUDE, N.; RODRIGUES, S.; BUSTILLO, V.; BRÉHÉRET, J. G.; MACAIRE, J. J.; JUGÉ, P. Estimating bedload transport in a large sand–gravel bed river from direct sampling, dune tracking and empirical formulas. **Geomorphology**, v. 179, p. 40–57, 2012.

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 27, p. 743-753, 2003.

CUNHA, N.G.; SILVEIRA, R.J.C.; SEVERO, C.R.S. **Estudo dos solos do município de Morro Redondo**. Pelotas, EMBRAPA-CPATC, Ed. UFPel, 1996. 28 p.

DEFERSHA, M. B.; MELESSE, A. M.; Field-scale investigation of the effect of land use on sediment yield and runoff using runoff plot data and models in the Mara River basin, Kenya. **Catena**, v. 89, p. 54-64, 2012.

DIDONÉ, E. J.; MINELLA, J. P. G.; REICHERT, J. M.; MERTEN, G. H.; DALBIANCO, L.; BARRROS, C. A. P. de; RAMON, R. Impact of no-tillage agricultural systems on sediment yield in two large catchments in Southern Brazil. **Journal Soils Sediments**, v. 14, p. 1287-1297, 2014.

DIPLAS, P.; KUHNLE, J.; GRAY, J.; GLYSSON, D.; EDWARDS, T. Sediment transport Measurements. In: GARCIA, Marcelo (Ed.). **Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling, and practice**. ASCE, 2008. P. 307-353.

DUVERT, C.; NORD, G.; GRATIOT, N.; NAVRATIL, O.; NADAL-ROMERO, E.; MATHYS, N.; NÉMERY, J.; REGÜÉS, D.; GARCÍA-RUIZ, J. M.; GALLART, F.; ESTEVES, M. Towards prediction of suspended sediment yield from peak discharge in small erodible mountainous catchments (0.45–22 km²) of France, Mexico and Spain. **Journal of Hydrology**, p. 42-55, 2012.

EDWARDS, T. E.; GLYSSON, G. D. **Field methods for measurement of fluvial sediment.** US Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, Book 3. US Geological Survey, 1999. 89 p.

EMMETTT, W. W. **A field calibration of the sediment-trapping characteristics of the Helley-Smith bed-load sampler.** US Geological Survey Professional Paper 1139. US Geological Survey, 1980. 44 p.

ERSKINE, W. D.; SAYNOR, M. J. Hydrology and bedload transport relationships for sand-bed streams in the Ngarradj Creek catchment, northern Australia. **Journal of Hydrology**, v. 483, p. 68-79, 2013.

GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Agregados em um Latossolo sob sistema plantio direto e rotação de culturas. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 45, n. 12, p. 1489-1498, 2010.

GUADAGNIN, J. C.; BERTOL, I.; CASSOL, P. C.; AMARAL, A. J. do. Perdas de solo, água e nitrogênio por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 29, p. 277-286, 2005.

HADDADCHI, A.; OMID, M. H.; SDEHGHANI, A. A.; Total load transport in gravel bed and sand bed rivers case study: Chelichay watershed. **International Journal of Sediment Research**, v. 28, n. 1, p. 46-57, 2013.

HADLEY, R. F.; LAL, R.; ONSTAND, C. A. WALLING, D. E.; YAIR, A. Erosion and sediment yield studies. **Technical documents in hydrologt**, Paris, v. 1, p. 1-127, 1985.

JANSSON, M. B. Determining sediment source areas in a tropical river basin, Costa Rica. **Catena**, v. 47, p. 63-84, 2002.

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, **Science of the Total Environment**, Reino Unido, v. 360, p. 109-126, 2006.

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, **Science of the Total Environment**, Reino Unido, v. 360, p. 109-126, 2006.

LIMA, W. P. **Princípios de Hidrologia Florestal para o manejo de bacias hidrográficas**. São Paulo: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1986. 242 p.

Hernani, L. C.; Freitas, P. L.; Pruski, F. F.; Maria, I. C.; Castro Filho, C.; Landers, J. N. A erosão e seu impacto. In: MANZATTO, C. V. JUNIOR, E. de F.; PERES, J. R. R (Ed.). **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. p. 47-60.

MEGIATO, E. I. **Análise da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Arroio Pelotas, RS**. 2011. 148 f. Dissertação (Dissertação em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MERTEN, G. H.; CAPEL, P. D.; MINELLA, J. P. G. Effects of suspended sediment concentration and grain size on three optical turbidity sensors. **Journal Soils Sediments**, v. 14, p. 1235-1241, 2014.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. Bedload flux in southern Brazilian basalt scarp. In: Sediment Dynamics from the Summit to the Sea. (Proceedings of a symposium held), New Orleans, Louisiana, USA. **Anais... USA**, 2014. p. 11-14.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. Impact on sediment yield due to the intensification of tobacco production in a catchment in Southern Brazil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 669-672, 2006.

MINELLA, J. P. G. Avaliação parâmetros hidrossedimentométricos numa bacia do Rio Grande do Sul. **Revista Eletrônica de Recursos Hídricos**, v. 1, n.1, p. 46-51, 2004.

MINELLA, J. P. G. **Utilização de técnicas hidrossedimentométricas combinadas com a identificação de fontes de sedimentos para avaliar o efeito do uso e do manejo do solo nos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica rural no Rio Grande do Sul**. 2007. 162 f. Doutorado (Tese em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Monitoramento de bacias hidrográficas para identificar fontes de sedimentos em suspensão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 3, p. 424-432, 2011.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; MAGNANO, P. F. Análise qualitativa e quantitativa da histerese entre vazão e concentração de sedimentos durante

eventos hidrológicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 1306-1313, 2011.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; REICHERT, J. M.; CASSOL, E. A. Processos e modelagem da erosão: da parcela à bacia hidrográfica. In:____. **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. 1.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. p. 486.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; REICHERT, J. M.; CLARKE, R. T. Estimating suspended sediment concentrations from turbidity measurements and the calibration problem. **Hydrol. Process**, v. 22, p. 1819-1830, 2008.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; WALLING, D. E.; REICHERT, J. M. Changing sediment yield as an indicator of improved soil management practices in southern Brazil. **Catena**, v. 79, p. 228-236, 2009.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. 3.ed. UK: Blackwell Publishing, 2005. 304 p.

MORO, M. **Avaliação do modelo Lisem na simulação dos processos hidrossedimentológicos de uma pequena bacia rural localizada nas encostas basálticas do Rio Grande do Sul**. 2011. 123 f. Doutorado (Tese em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, I. V. River Flow Forecasting Throigh Conceptual Models. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

OLD, G. H.; LEEKS, G. J. L.; PACKMAN, J. C.; SMITH, B. P. G.; LEWIS, S.;

HEWITT, E. J.; HOLMES, M.; YOUNG, A. The impact of a convectional summer rainfall event on river flow and fine sediment transport in a highly urbanised catchment: Bradford, West Yorkshire. **The Science of the Total Environment**, p. 495-512, 2003.

OLIVEIRA, F. P. de; BUARQUE, D. C.; VIERO, A. C.; MERTEN, G. H.; CASSOL, E. A.; MINELLA, J. P. G. Fatores relacionados à suscetibilidade da erosão em entressulcos sob condições de uso e manejo do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.16, n.4, p.337-346, 2012.

OLIVEIRA, F. P. de; SOBRINHO, T. A.; STEFFEN, J. L.; RODRIGUES, D. B. B. Caracterização morfométrica de bacias hidrográficas através de dados SRTM.

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, PB, v. 14, n. 8, p. 819-825, 2010.

PAVANELLI, D.; PAGLIARANI, A. Monitoring Water Flow, Turbidity and Suspended Sediment Load, from an Apennine Catchment Basin, Italy. **Biosystems Engineering**, v. 83, n. 4, p. 463-468, 2002.

PELLEGRINI, A.; KOCHER, M. L.; SCHAEFER, G. L.; ALVAREZ, J. W. R.;

SANTOS, D. R. dos; MINELLA, J. P. G.; ALBUGERI, F. E.; GUBIANI, E. Calibração de turbidímetro para estimativa da concentração de sedimento em suspensão em uma pequena bacia hidrográfica. In: XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. **Anais...**Uberlândia, Minas Gerais, 2010. p.1-4.

PISSARRA, T. C. T.; POLITANO, W.; FERRAUDO, A. S. Avaliação de características morfométricas na relação solo-superfície da bacia hidrográfica do córrego rico, Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 297-305, 2004.

POLYAKOV, V. O.; NEARING, M. A.; NICHOLS, M. H.; SCOTT, R. L.; STONE, J. J.; MCCLARAN, M. P. Long-term runoff and sediment yields from small semiarid watersheds in southern Arizona. **Water Resources Research**, v. 46, p. 1-12, 2010.

RODRIGUES, M. F.; REICHERT, J. M.; MINELLA, J. P. G.; DALBIANCO, L.; LUDWIG, R. L.; RAMON, R.; RODRIGUES, L. A.; BORGES JÚNIOR, N. Hydrosedimentology of nested subtropical watersheds with native and eucalyptus forests. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, p.1311-1324, 2014.

ROSS, J.L.S. **Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados**. In: Revista do Departamento de Geografia, 8, FFCCH/USP. SP. 1994.

RODRIGUES, M.F. **Monitoramento e modelagem dos processos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas florestais no Sul do Brasil**. 2011. 202 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

ROVIRA, A.; BATALLA, R. J.; SALAB, M. Fluvial sediment budget of a Mediterranean river: the lower Tordera (Catalan Coastal Ranges, NE Spain). **Catena**, v. 60, p. 19-42, 2005.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. **Hidrometria Aplicada**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, 2001. 372 p.

SCAPIN, J.; PAIVA, J. B. D. de; BELING, F. A. Avaliação de métodos de cálculo do transporte de sedimentos em um pequeno Rio Urbano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 4, p. 05-21, 2007.

SECRETÁRIA DO MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL-SEMA. Disponível em:< <http://www.sema.rs.gov.br/>>. Acesso em: 10 fev. 2015.

SEEGER, M.; ERREA, M. P.; BEGUERÍA, S.; ARNÁEZ, J.; MARTÍ, C.; GARCIA-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, p. 299-311, 2004.

SILVA, M. A. S. da; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; ROSA, J. D.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um argissolo vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 30, p. 329-337, 2006.

SILVA, P. M. O.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M. & COELHO, G. Modelagem da hidrografia de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **R. Bras. Eng. Agric. Amb.** v. 12, p. 258-265, 2008.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C. do; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2.ed. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008. 222 p.

SYVITSKI, J. P. M.; SAITO, Y. Morphodynamics of deltas under the influence of humans. **Global and Planetary Change**, n. 57, p. 261-282, 2007.

TEODORO, V. L.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Uniara**, n. 20, p. 137-156, 2007.

TONELLO, K. C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da cachoeira das pombas, Guanhões, MG**. 2005. 69 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, 2005.

TONELLO, K. C.; DIAS, H. C. T.; SOUZA, A. L. de; RIBEIRO, C. A. A. S.; LEITE, F. P. Morfometria da bacia hidrográfica da cachoeira das pombas, Guanhões – MG. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 30, n. 5, p. 849-857, 2006.

TOY, T. J.; FOSTER, G. R.; RENARD, K. G. **Soil erosion: processes, prediction, measurement, and control**. New York: John Wiley & Sons, 2002. 337 p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4.ed. Porto Alegre: Editora da Universidade (UFRGS), 2009. 952 p.

TUROWSKI, J. M.; RICKENMANN, D.; DADSON, S. J. The partitioning of the total sediment load of a river into suspended load and bedload: a review of empirical data. **Sedimentology**, v. 57, p. 1126-1146, 2010.

VALERIANO, M. M.; KUPLICH, T. M.; STORINO, M.; AMARAL, B. D.; MENDES JR, J. N.; LIMA, D. J. Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission-90m data. **Computers & Geosciences**, v. 32, p. 1169-1181, 2006.

VEIGA, M. da; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Aggregate stability as affected by short and long-term tillage systems and nutrient sources of a hapludox in southern Brazil. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 33, p. 767-777, 2009.

VESTENA, L.R.; LUCINI, H.; KOBAYAMA, M. Monitoramento Automático da concentração de sedimentos em suspensão na bacia hidrográfica do Caeté, Alfredo Wagner/SC. In: I WORKSHOP REGIONAL DE GEOGRAFIA E MUDANÇAS AMBIENTAIS, 2007, Guarapuava. **Anais...** Guarapuava: Ed. Unicentro, 2007, p. 61-70.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. 1 ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

WILCOCK, P.; PITLICK, J.; CUI, Y. **Sediment transport primer: estimating bed-material transport in gravel-bed rivers**. Gen. Tech. Rep. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2009. 78 p.

WILLIAMS, G. P. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. **Journal of Hydrology**, v. 111, p. 89-116, 1989.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION-WMO. **Manual on sediment management and measurement**. Operational hydrology report, 2003. 176 p.

YASSUDA, E. R. Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais. **Rev. Adm. Púb.**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 2, p. 5-18, 1993.

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, p. 179-190, 2007.

ZIEGLER, A. D.; BENNER, S. G.; TANTASIRIN, C.; WOOD, S. H.; SUTHERLAND, R. A.; SIDLE, R. C.; JACHOWSKI, N.; NULLET, M. A.; XI, L. X.; SNIDVONGS, A.; GIAMBELLUCA, T. W.; FOX, J. M. Turbidity-based sediment monitoring in northern Thailand: Hysteresis, variability, and uncertainty. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 2020-2039, 2014.