

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



Dissertação

Estimativa da produção de sedimentos e da perda de solo com uso de um MDE
obtido por um Veículo Aéreo Não Tripulado

Rute Daniela Chaves

Pelotas
2017

Rute Daniela Chaves

Estimativa da produção de sedimentos e da perda de solo com uso de um MDE
obtido por um Veículo Aéreo Não Tripulado

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

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares - UFPel

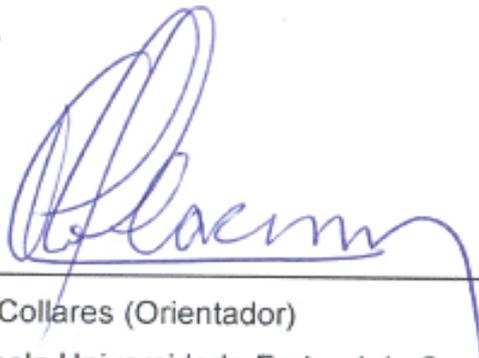
Pelotas
2017

Rute Daniela Chaves

Estimativa da produção de sedimentos e da perda de solo com uso de um MDE
obtido por um Veículo Aéreo Não Tripulado

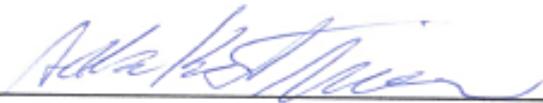
Data da Defesa: 02/03/2017

Banca examinadora:



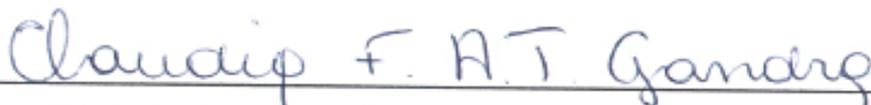
Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares (Orientador)

Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria - UFSM



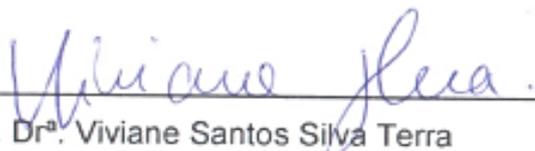
Dr. Adalberto Koiti Miura

Doutor em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais -
INPE



Prof.ª. Dr.ª. Claudia Fernanda Almeida Teixeira-Gandra

Doutora em Agronomia pela Universidade de São Paulo - USP



Prof.ª. Dr.ª. Viviane Santos Silva Terra

Doutora em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas - UFPEL

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

C512e Chaves, Rute Daniela

Estimativa da produção de sedimentos e da perda de solo com uso de um MDE obtido por um veículo aéreo não tripulado / Rute Daniela Chaves ; Gilberto Loguercio Collares, orientador. — Pelotas, 2017.

88 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2017.

1. MUSLE. 2. Hidrossedimentos. 3. Modelagem. 4. SIG. 5. Erosão. I. Collares, Gilberto Loguercio, orient. II. Título.

CDD : 333.91

Elaborada por Aline Herbstrith Batista CRB: 10/1737

Dedicatória

À Deus.

Agradecimentos

Primordialmente, agradeço a Deus por soprar em mim o ar da vida e abastecer-me com a energia da perseverança, para lutar contra todas as dificuldades que, um dia após outro, nos deparamos como pedras em nossas trilhas.

Agradeço à Universidade Federal de Pelotas pelo ensino público e de qualidade desde minha graduação, a qual foi base para este trabalho de mestrado.

Agradeço à minha mãe pelo apoio sempre prestado durante minhas decisões e escolhas nesta trajetória, mesmo nesses anos mais difíceis estava ali firme e forte aguentando junto.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares por ter confiado a mim a responsabilidade deste trabalho de pesquisa, por ter sido paciente e compreendido minhas limitações e por dividir comigo o seu conhecimento e experiência.

A Prof^a. Dr^a. Viviane Terra pelo tempo a mim dedicado, pela paciência, pelas preciosas dicas e conselhos, pelos materiais concedidos e por aceitar integrar a atual banca.

Agradeço ao Msc. Guilherme Bartels por sua amizade, paciência, por sua ajuda e dedicação, sempre junto nesta jornada de trabalho.

Aos colegas e amigos do Programa de Pós-Graduação Alice, José Henrique, Luana e Maurício pelos momentos vivenciados. A Roberta Karsburg pelo rápido, porém alegre, carinhoso e gratificante relacionamento que criamos e que espero não se perca.

Agradeço aos estagiários e bolsistas de iniciação científica do Laboratório de Hidrossedimentologia: Henrique, George, Luciana, Felipe Alame e Felipe Prestes, pelos momentos de amizade, coleguismo, pelos ensinamentos e pelo apoio para que esse trabalho se concretizasse. Graciane, Rafaele, Michela sem vocês eu não conseguiria vetorizar as classes para toda a bacia. Ao Reginaldo Bonczynski, técnico do laboratório, pelo apoio no trabalho e o conhecimento compartilhado.

Agradeço imensamente a Daiane Zarnot, Lucia Elena da Cruz, Henrique Cunha e a Natalie Braz pela amizade, pelos puxões e orelha, apoio, e incentivo para entrar no mestrado, pelos ensinamentos e conhecimentos compartilhados desde os tempos da graduação, se não fosse vocês nada disso teria iniciado ou existido.

Aos queridos amigos que tornaram esta jornada muito mais feliz e em especial, Mariana Ramos e Nathália Bissaque Pessota, muito obrigada pelo brilho que iluminou este caminho e o tornou mais tranquilo.

À Fundação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro.

Ao grupo de Bolsistas da CAPES pelas experiências e dicas compartilhadas.

Enfim, a todos, mesmo aqueles que porventura possa ter esquecido de mencionar, que contribuíram direta ou indiretamente, mas que de alguma forma sempre me apoiaram e deram carinho para que esta dissertação fosse elaborada, **MUITO OBRIGADA.**

“Crescer significa mudar e mudar envolve riscos,
uma passagem do conhecido para o desconhecido. ” – A Cabana

Resumo

CHAVES, R.D. Estimativa da produção de sedimentos e da perda de solo com uso de um MDE obtido por um Veículo Aéreo Não Tripulado. 2017, 88p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas/RS, 2017.

O estudo da fisiografia de uma bacia hidrográfica é importante, para determinar e caracterizar o comportamento hídrico e sedimentológico, os quais são influenciados pelos diferentes tipos de uso e manejo do solo. As características fisiográficas do terreno, observadas em uma bacia hidrográfica, tais como forma, altitude, declividade, posicionamento das vertentes na paisagem, cobertura vegetal e também o tipo e uso da terra servem de apoio na sua modelagem hidrológica. Objetivou-se levantar as características fisiográficas do terreno de uma pequena bacia rural. A partir de um Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT) que captura imagens de alta resolução, e a partir do tratamento dessas, monitorar sazonalmente as mudanças provocadas pelo uso e manejo do solo e suas relações com os processos erosivos, além da estimativa da produção de sedimentos. O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro, localizada entre os municípios de Pelotas e Morro Redondo/RS, com área de 221 ha. O monitoramento hidrossedimentológico contínuo foi durante o período de agosto a novembro de 2016, com pluviógrafos, sensor de pressão (nível) e sensor de turbidez (turbidímetro). O levantamento aéreo foi realizado com 5 voos durante o período de novembro de 2015 a março de 2016. Os resultados demonstraram que os coeficientes *a* e *b* calibrados na Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE) tornou-se capaz de representar adequadamente o aporte de sedimentos na bacia do Arroio do Ouro. A utilização do VANT na obtenção de dados geospaciais permitiu a construção de um modelo digital de superfície (MDS) e um modelo digital de elevação (MDE) consistentes, bem como sua relação com modelos matemáticos com um modelo de perda de solo ou produção de sedimentos mais consistentes.

Palavras-Chave: MUSLE, modelagem, erosão, hidrossedimentos, SIG.

Abstract

CHAVES, R.D. Estimation of sediment production and soil loss using an EDM obtained by an Unmanned Aerial Vehicle. 2017, 88p. Dissertation (Master in Water Resources) Post-Graduation Program in Water Resources, Center for Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas / RS, 2017.

The study of the physiography of a river basin is important to determine and characterize the water and sedimentological behavior, which are influenced by the different types of land use and management. The physiographic characteristics of the terrain, observed in a hydrographic basin, such as form, altitude, slope, positioning of the slopes in the landscape, vegetation cover and also the type and use of the land serve as support in its hydrological modeling. The objective was to raise the physiographic characteristics of the terrain of a small rural basin. From an unmanned aerial vehicle (UAV) that captures high resolution images, and from the treatment of these, to monitor seasonally the changes brought about by the use and management of the soil and its relations with the erosive processes, besides the estimation of the production of sediments. The study was carried out in the Arroio do Ouro basin, located between the municipalities of Pelotas and Morro Redondo / RS, with an area of 221 ha. The continuous hydrosedimentological monitoring was during the period of August to November of 2016, with rain gauges, pressure sensor (level) and turbidity sensor (turbidimeter). The aerial survey was carried out with 5 flights during the period from November 2015 to March 2016. The results demonstrated that the coefficients a and g calibrated in the Universal Equation of Modified Soil Loss (MUSLE) became able to adequately represent the contribution of sediments in the Arroio do Ouro basin. The use of VANT in obtaining geospatial data allowed the construction of a consistent digital surface model (MDS) and digital elevation model (MDE), as well as its relation with mathematical models with a model of soil loss or sediment production. More consistent.

Keywords: MUSLE, modeling, erosion, hydrosediments, GIS.

Lista de Figuras

Figura 1 - Mapa de localização da bacia do Arroio do Ouro.	33
Figura 2 - MicroVANT de asa fixa Zangão V.	34
Figura 3 - Marco topográfico próximo ao exutório da bacia e receptor GPS Promark 500	36
Figura 4 - Sessão de monitoramento construída na área de estudo na bacia do Arroio do Ouro.	40
Figura 5 - Equipamento FlowTracker durante medições em campo (A). Sensor do equipamento dentro da água durante medição (B).	41
Figura 6 - Curva-chave de vazão da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	42
Figura 7 - Amostrador a vau SDH 81 para sedimento em suspensão.	43
Figura 8 - Sistema de filtração acoplado a uma bomba de sucção.	44
Figura 9 - Mapa de localização da estação pluviométrica (A) e estação automática modelo Agsolver (B)	45
Figura 10 - Hidrógrafa e os seus principais componentes.	47
Figura 11 - Método dos trapézios para o cálculo do volume escoado superficialmente.	47
Figura 12 - Posição das imagens coletadas e número de imagens sobrepostas.....	53
Figura 13 - Localização dos pontos de controle no terreno.....	54
Figura 14 – Ortofotomosaico da bacia do Arroio do Ouro	55
Figura 15 – Localização do veículo (A) e o detalhamento dos telhados das propriedades localizadas na bacia (B) (C) (D) através do ortomosaico	56
Figura 16 - Mapa hipsométrico da bacia hid	57
Figura 17 - Mapa de declividades da Bacia do Arroio do Ouro	61
Figura 18 - Queda d'água localizada no centro da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro	62
Figura 19 - Mapa de cobertura e uso do solo da bacia do Arroio do Ouro.....	63

Figura 20 – Valores contínuos diários de vazão (Q) e precipitação durante o período de monitoramento da bacia do Arroio do Ouro.....	66
Figura 21 - Evento 9 dia 24 de outubro.....	69
Figura 22 – Evento 1 dia 31 de agosto.....	69
Figura 23 - Evento 5 dia 6 de setembro.....	70
Figura 24 - Evento 7 dia 16 de outubro.....	71
Figura 25 - Evento 11 dia 1 de novembro.....	71
Figura 26 – Fator topográfico (LS) na bacia do Arroio do Ouro.....	72
Figura 27 - Fator de uso e manejo do solo (C) na bacia do Arroio do Ouro.....	73
Figura 28 – Fator de práticas conservacionistas (P) na bacia do Arroio do Ouro.....	74
Figura 29 - Aporte de sedimentos observados em campo e estimados pela MUSLE com seus coeficientes calibrados.....	77

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Modelos de VANT e suas características de acordo com Nanomi et al. (2010).....	26
Tabela 2 - Categorias de VANT de acordo com UVS International.....	26
Tabela 3 - Valores do fator C para diferentes usos do solo e culturas utilizados na modelagem para a bacia do Arroio do Ouro	50
Tabela 4 - Valores de P para uso e ocupação dos solos da região em estudo.....	51
Tabela 5 - Caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.....	60
Tabela 6 - Classificação de declividades do relevo de acordo com EMBRAPA (2006) e distribuição da área de ocupação e da porcentagem de cada declividade da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.	60
Tabela 7 - Distribuição da área de ocupação e da porcentagem de cada uso do solo da Bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.	62
Tabela 8 - Valores médios semanais da precipitação total, da vazão, da concentração de sedimentos em suspensão para o período do monitoramento no ano de 2016 na bacia de Arroio do Ouro	65
Tabela 9 - Variáveis hidrossedimentológicas dos eventos monitorados na bacia do Arroio do Ouro.....	67
Tabela 10 - Classes de ocorrência do fator topográfico baseado.	73
Tabela 10 - Valores definidos para fatores da MUSLE à bacia do Arroio do Ouro....	75
Tabela 11 – Comparação dos valores da produção de sedimento medida e a estimada pela MUSLE.	76

Sumário

1	Introdução.....	15
2	Objetivos.....	16
2.1	Geral.....	16
2.2	Específicos	16
3	Hipótese.....	16
4	Revisão de literatura.....	17
4.1	Bacia hidrográfica	17
4.2	Geomorfologia e fisiografia	18
4.3	Processo erosivo	19
4.4	Processo hidrossedimentológico	21
4.5	Modelagem hidrossedimentológica	23
4.6	Veículo aéreo não tripulado.....	25
4.7	Fotogrametria	27
5	Material e Métodos	33
5.1	Características da área de estudo	33
5.2	Aquisição de dados através de levantamento aéreo	34
5.3	Caracterização fisiográfica.....	36
5.4	Monitoramento hidrossedimentológico	40
5.4.1	Sessão de monitoramento.....	40
5.4.2	Monitoramento da descarga líquida.....	40
5.4.3	Monitoramento da concentração de sedimentos em suspensão (C _{ss})	42
5.4.4	Procedimento analítico gravimétrico por filtração	44
5.4.5	Monitoramento da precipitação.....	45
5.5	Equação universal de perda de solo modificada (MUSLE).....	46
5.5.1	Fator Q e q _p	46

5.5.2	Fator K.....	48
5.5.3	Fator LS.....	49
5.5.4	Fator C.....	50
5.5.5	Fator P.....	51
6	Resultados e Discussão	53
6.1	Processamento dos dados do levantamento aéreo	53
6.1.1	Pontos de controle	54
6.1.2	Ortomosaico	55
6.1.3	Modelo Digital de Elevação	57
6.2	Caracterização fisiográfica.....	58
6.3	Cobertura e uso do solo.....	62
6.4	Monitoramento hidrossedimentológico	64
6.4.1	Monitoramento das variáveis hidrossedimentológicas em escala semanal	64
6.4.2	Monitoramento das variáveis hidrossedimentológicas em escala de evento ..	66
6.5	Equação universal de perda de solo modificada (MUSLE).....	71
6.5.1	Estimativa da produção de sedimentos	76
7	Conclusões.....	78
	Referencias	79
	Apêndices.....	87

1 Introdução

O estudo da fisiografia de uma bacia hidrográfica é importante para determinar e caracterizar o comportamento hídrico e sedimentológico, os quais podem influenciados pelos diferentes de manejos do solo. A bacia hidrográfica é uma área onde a captação de água da chuva converge, através de cursos d'água, para um mesmo ponto, denominado exutório. É considerada ideal para os estudos relacionados ao meio físico, local onde ocorrem fenômenos naturais, tais como a chuva, sendo uma unidade fundamental para os processos como escoamentos hídrico e sedimentar que são influenciados pelo manejo do solo e pela distribuição e densidade dos cursos d'água existentes.

As características fisiográficas da bacia hidrográfica, tais como forma, altitude, declividade, posicionamento das vertentes na paisagem, cobertura vegetal e o tipo e uso do solo servem de apoio para sua modelagem hidrológica. Modificações sazonais, tais como aquelas provocadas pelo manejo do solo, no preparo do solo e a implantação de culturas agrícolas, colaboram para a quantidade de sedimentos produzidos, durante um determinado evento de chuva. Por isso, o monitoramento adequado de eventos de precipitação que ocorrem em uma bacia, bem como da erosão e da produção de sedimentos se torna cada vez mais importante, em especial aqueles associados ao uso e manejo do solo. O monitoramento utilizando imagens aéreas tem sido usado em estudos dessa natureza em especial aquele que emprega Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT), considerado útil na caracterização espacial de pequenas bacias rurais. É possível empregá-lo como ferramenta auxiliar para o acompanhamento do desenvolvimento fenológico das culturas e das mudanças provocadas pelas chuvas nos cursos d'água, além da observação de processos erosivos, tanto no espaço, quanto no tempo. Com o VANT é possível a criação de um Modelo Digital de Superfície (MDS), a partir das as imagens coletadas através de voos sucessivos numa mesma área, que permite extrair informações fisiográficas e das modificações naturais e antrópicas num determinado período de tempo.

O estudo da fisiografia e das alterações temporais causadas pelo uso e manejo do solo, na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro, local de estudo do projeto, espera-se observar e analisar influências do uso e manejo do solo, nos cursos d'água, na vegetação e especialmente na produção de sedimentos e erosão.

2 Objetivos

2.1 Geral

Realizar o levantamento das características fisiográficas da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro- RS, a partir de um veículo aéreo não tripulado e estimar a produção de sedimentos utilizando a Equação Universal de Perda de Solo Modificada.

2.2 Específicos

- i) Realizar o levantamento aéreo preliminar da bacia hidrográfica, com o auxílio de um VANT;
- ii) Caracterizar fisiograficamente a bacia através de imagens de alta resolução;
- iii) Avaliar a relação entre o uso de pontos de apoio para o georreferenciamento em campo, e aferir a qualidade posicional e altimétrica do modelo digital de elevação (MDE), obtidos a partir do produto do VANT;
- iv) Monitorar a produção de sedimentos em suspensão, frente aos principais eventos de precipitação;
- v) Simular a perda de solo pela equação Universal de Perda de Solo Modificada.

3 Hipótese

A partir da adequada calibração dos parâmetros da MUSLE, esta pode ser utilizada para estimar a perda de solo de maneira apropriada.

4 Revisão de literatura

4.1 Bacia hidrográfica

A água é um recurso natural essencial à vida e ao desenvolvimento socioeconômico da população. É através do ciclo hidrológico que esse recurso é normalmente estudado com maior interesse, onde o elemento fundamental de análise é a bacia hidrográfica.

A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água da precipitação, que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório. Também pode ser considerada um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, considerando como perdas intermediárias os volumes evaporados, transpirados e infiltrados no solo (TUCCI, 2002). A bacia hidrográfica consiste no resultado da interação da água e de outros recursos naturais como o material de origem, topografia, vegetação e clima (ARAÚJO et al., 2009).

World (2004) define a bacia hidrográfica como um espaço tridimensional que integra as interações entre a cobertura do terreno, as profundidades do solo e o entorno das linhas divisórias das águas. Esse conjunto forma um sistema que envolve quatro subsistemas o biológico, que essencialmente compõem a flora e fauna, e os elementos cultivados pelo homem, o físico, composto pelo solo, subsolo, geologia, recursos hídricos e clima (temperatura, radiação solar, evaporação, etc.); o econômico, composto por todas as atividades produtivas do homem na agricultura, recursos naturais, pecuária, indústria, serviços (estradas, rodovias, energia, assentamentos e cidades) e; o social, composto por dados demográficos, institucionais, a posse da terra, saúde, educação, habitação, culturais, organizacionais, políticos, etc. É importante ressaltar que esses elementos variam de acordo com a dimensão da bacia e sua localização geográfica.

Segundo Prado et al. (2012) é importante o levantamento e caracterização de seus fatores fisiográficos. Dentre as características do meio físico relevantes para o planejamento e manejo de bacias hidrográficas, visando a conservação dos recursos hídricos, destacam-se a drenagem, a pedologia, a geologia, a geomorfologia e a pluviosidade. Os autores destacam que o primeiro fator que deve ser levado em consideração em um planejamento é a realização de uma completa caracterização do

sistema a ser focado. Este conjunto de informações possibilita conhecer o sistema, o que dará suporte ao embasamento de proposta e tomada de decisões.

Campanharo, Hollanda e Cecílio (2012) descrevem que o manejo correto de bacias hidrográficas envolve a elaboração de diversos diagnósticos físico-conservacionista, socioeconômico, ambiental, vegetação, água, fauna e solo, na qual identificam os problemas da bacia, determinando soluções e recomendações para a recuperação do meio ambiente. O manejo integrado de bacias hidrográficas procura adequar a interferência antrópica às características biofísicas destas unidades naturais, sob gestão integrativa e participativa, de forma a minimizar impactos negativos e garantir o desenvolvimento sustentável.

4.2 Geomorfologia e fisiografia

O estudo das formas da superfície terrestre ocorre desde os primórdios da humanidade, através de fábulas, mas foi durante o século XIV que Leonardo Da Vinci (1452-1519) reconheceu a relação existente entre os vales e seus respectivos rios (CHRISTOFOLETTI, 1980).

A geomorfologia é a ciência que se ocupa do estudo das formas da Terra, sendo considerada importante para o conhecimento e planejamento do espaço ocupado pelo homem caracterizado por variações no terreno em toda sua extensão. É esta ciência que fornece subsídios para identificar, registrar e analisar os processos de evolução da paisagem. Para Christofolletti (1980), a geomorfologia possui formas que representam a expressão espacial de uma superfície, compondo as diferentes configurações da paisagem morfológica. No decorrer do tempo geológico, muitas topografias foram elaboradas e destruídas pela erosão ou pelo recobrimento sedimentar.

No Brasil, o estudo geomorfológico foi sistematizado em três níveis de abordagem: a compartimentação morfológica, o levantamento da estrutura superficial e o estudo da fisiologia da paisagem. A compartimentação morfológica inclui observações relativas aos diferentes níveis topográficos e as características do relevo, na qual apresentam uma importância direta no processo de ocupação e uso do solo. O levantamento da estrutura superficial é considerado um importante elemento na definição do grau de fragilidade do terreno, sendo responsável pelo entendimento histórico da sua evolução. Já a fisiologia da paisagem diz respeito ao momento atual

do quadro evolutivo do relevo, considerando os processos morfodinâmicos, bem como as transformações produzidas na paisagem, pela intervenção antrópica, ou seja, tem por objetivo compreender os processos morfoclimáticos e pedogênicos atuais (AB'SÁBER, 1968).

Para Villota (1991), a geomorfologia e a fisiografia têm por objeto descrever e explicar as formas de relevo, assim como sua origem e desenvolvimento, sendo que a primeira classifica as paisagens segundo a morfogênese, morfografia, morfometria e morfocronologia. A fisiografia classifica e correlaciona o relevo levando em consideração o clima atual, geologia, hidrologia e indiretamente os aspectos bióticos, que sejam relevantes para definir as paisagens fisiográficas que representam unidades homogêneas. O princípio básico da análise fisiográfica é a existência de uma relação direta entre as propriedades externas de uma paisagem e suas características internas, expressas nos perfis de solos. Cada unidade fisiográfica apresenta uma fisionomia reconhecível e diferente das demais, além de delimitar uma porção da superfície terrestre, com uma morfogênese específica dentro da qual se espera certa homogeneidade pedológica (SOUZA; JIMÉNEZ-RUEDA, 2007).

O estudo das características fisiográficas da bacia hidrográfica, bem como seu uso e ocupação, no geral, tornam-se importantes fatores para a avaliação da degradação ambiental que essa bacia possa estar sofrendo (ARAÚJO et al., 2009). A ocupação das terras e as atividades nela desenvolvidas resultam em interações entre o homem e o meio ambiente, ou seja, aspectos geomorfológicos, solos, precipitação e outros. Através de um levantamento integrado dos aspectos físicos, importantes subsídios ao planejamento de uso podem ser gerados (PRADO et al., 2012).

4.3 Processo erosivo

O termo erosão vem do latim, do verbo “*erodere*” (escavar). Em adição ao termo, vários outros foram usados para expressar processos geomorfológicos causados pela água e pelo vento. Estes incluíram os termos estabelecidos “*corrodere*” (corrosão), “*abradere*” (abrasão) e “*denudere*” (denudação) (ZACHAR, 1982).

Morgan (2005) descreve que a erosão do solo é um processo sistemático que consiste no desprendimento de partículas do solo individuais e seu transporte por agentes erosivos, como a água corrente e o vento. 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.

A prevenção da erosão do solo para reduzir a sua taxa de perda, ao que seria uma perda em condição natural, depende da seleção de estratégias apropriadas para a conservação do solo, e este, por sua vez, exige um conhecimento profundo dos processos de erosão (MORGAN, 2005).

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. Destas, apenas o manejo e o uso do solo podem ser controlados ou sofrer influência do homem (MORO, 2005). Os fatores que influenciam a taxa de erosão podem ser considerados sob três grupos: energia, resistência e proteção. O grupo de energia inclui a capacidade potencial de chuvas, o escoamento e do vento para causar erosão. Esta capacidade é denominada erosividade. Também estão incluídos os fatores que afetam diretamente o poder dos agentes erosivos, como a redução do tempo de escoamento ou vento soprar através da construção de terraços e quebra-ventos, respectivamente. Fundamental para o grupo de resistência é a erodibilidade do solo, o que depende de as suas propriedades mecânicas e químicas. Fatores que incentivam a infiltração de água no solo e, assim, reduzir o escoamento diminuição erodibilidade, enquanto qualquer atividade que pulveriza o solo aumenta-lo. Assim, o cultivo pode diminuir a erodibilidade dos solos argilosos, mas aumentar a de solos arenosos. O grupo de proteção concentra-se em fatores relacionados com a cobertura vegetal. Ao interceptar chuva e reduzindo a velocidade de escoamento e do vento, a cobertura vegetal pode proteger o solo da erosão. Cobertura vegetal diferente oferece diferentes graus de proteção, de modo que a influência humana, através da determinação do uso da terra, pode controlar a taxa de erosão num grau considerável (MORGAN, 2005). Deste modo, os estudos do processo erosivo compreendem muito mais que apenas os locais onde ocorre a desagregação do solo, mas também a dinâmica vinculada ao transporte e a deposição do material.

A utilização da bacia hidrográfica como recorte espacial básico para os estudos relacionados aos processos erosivos e a produção de sedimentos, tendo em vista que as alterações decorrentes das interferências humanas sobre os recursos naturais refletem na bacia como um todo (IBGE, 2009). Para Capoane et al. (2015) os atributos topográficos derivados de dados de Modelo Digital de Elevação (MDE) refinado, foram

utilizados para a predição dos locais com maior propensão a perda de solo e deposição de sedimentos, através da álgebra de mapas. Os autores também ressaltam que quando são realizadas as estimativas de perda de solo em bacias hidrográficas, as informações de relevo normalmente utilizadas são de baixa resolução espacial, o que compromete a precisão dos resultados. Dessa forma, o mapeamento e a avaliação do risco de erosão se torna uma importante ferramenta para o planejamento da gestão dos recursos naturais de uma bacia hidrográfica, capaz de permitir modificações no uso e manejo do solo (SILVEIRA, 2015).

4.4 Processo hidrossedimentológico

Os processos hidrossedimentológicos são complexos e compreendem a desagregação, transporte, sedimentação e consolidação de sedimentos (VESTENA et al., 2007). Para Carvalho (2008), os sedimentos são partículas derivadas da rocha que podem ser transportadas por um fluído, ou seja, é o material sólido em suspensão na água ou depositado no leito do rio. 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.

O transporte de partículas, também conhecido como carga sólida, varia de acordo com as condições locais e conforme o regime de escoamento, assim como, o tamanho e o peso da partícula. As formas de transporte são classificadas em carga de fundo (ou carga do leito) e carga em suspensão (ou carga sólida em suspensão) (WMO, 2003).

Para uma melhor compreensão da interação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia hidrográfica, influenciada pelos os efeitos de uso e manejo do solo, necessita-se do monitoramento das variáveis envolvidas, tais como vazão, concentração de sedimentos em suspensão, precipitação e sedimento transportado em arraste (MINELLA, 2007). O monitoramento deve ser capaz de representar de maneira adequada a produção de sedimentos utilizando técnicas apropriadas para sua estimativa, sendo realizadas de acordo com o objetivo do estudo. O estudo do comportamento hidrossedimentológico pode ser analisado através das curvas que relacionam a concentração ou descarga de sedimentos versus

a vazão. A relação entre essas duas variáveis permite inferir sobre o entendimento da transferência de sedimentos e água, durante os eventos (BARROS, 2012).

O conhecimento da produção de sedimentos em bacias hidrográficas é extremamente importante no planejamento e gestão dos recursos hídricos. Tais informações são fundamentais no dimensionamento e operação de obras hidráulicas, interferindo decisivamente nos custos de implantação e manutenção dos sistemas. Poucas são as informações sobre a produção de sedimentos à campo, pois os custos envolvidos no seu monitoramento são elevados. Para suprir essa deficiência de informações, são utilizados modelos matemáticos que fornecem estimativas a partir de dados de tipo e uso do solo, relevo e cobertura vegetal (BELLINASSO; PAIVA, 2007).

O desenvolvimento de uma seção de monitoramento requer alguns cuidados quanto a escolha do local. Conforme Santos et al. (2001) escolher um trecho do rio que seja o mais retilíneo possível, onde as margens sejam suficientemente altas para acomodar o escoamento, haver uma seção controle de jusante, como quedas, corredeiras e cachoeiras, fácil acesso a esta seção, principalmente durante os eventos de chuva, escolher uma seção próxima a uma residência para evitar depredação de equipamentos, evitar locais nas proximidades da foz de rios e oceanos e evitar seções logo à jusante de confluência de rios são características são importantes. Em alguns casos, dificilmente reuniu-se todas essas características, todavia, deve-se buscar atingir o maior número possível delas.

Para Barros (2012) é importante salientar que em pequenas bacias, a maior transferência de água, sedimentos e poluentes ocorre nos períodos de cheias, quando a vazão do rio está acima do seu nível normal. Bellinasso e Paiva (2007) ressaltam que o monitoramento de pequenas bacias hidrográficas apresenta sérias dificuldades, sendo a maioria ligado ao seu regime hidrológico, uma vez que as respostas são muito rápidas, fazendo com que nem sempre seja possível realizar as medições necessárias durante as ondas de cheia.

Assim sendo, 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 (BARTELS, 2015).

4.5 Modelagem hidrossedimentológica

Diversos modelos para estimar as perdas de solo e água têm sido desenvolvidos e sua aplicação, para a realidade brasileira, tem sido um desafio para os pesquisadores, dadas as grandes diferenças nas características de solo e clima, para os quais os modelos foram desenvolvidos (CECATTO, 2014). A estimativa da erosão do solo pode ser realizada por um modelo matemático que simule de maneira adequada a produção de sedimentos (BORSELLI et al., 2001; HOLDEN; BURT, 2002).

A modelagem da erosão hídrica é importante para a compreensão dos processos que regem ao solo, a previsão de taxas de erosão por escoamento e identificação de medidas adequadas de escolher ou controle da erosão. A modelagem permite a compreensão dos processos de transporte, a avaliação dos impactos causados dentro e fora do local em estudo, a fertilidade do solo, a identificação de estratégias para o controle da erosão e a avaliação do desempenho de práticas de conservação do solo para a redução da erosão hídrica (BLANCO-CANQUI; LAL, 2010). Entre os modelos mais utilizados, existe a Equação Universal de Perdas do Solo Revisada, conhecido como modelo *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE) (RENARD et al., 1997), adaptado a partir da *Universal Soil Loss Equation* (USLE) (WISCHMEIER; SMITH, 1978) assim como os modelos *Modified Universal Soil Loss Equation* (MUSLE) (WILLIAMS, 1975), *Water Erosion Prediction Project* (WEPP) (LAFLEN et al., 1991), entre outros.

Silveira (2015) destaca entre as citadas, a Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE) (WILLIAMS, 1975) que avalia o escoamento superficial e a vazão de pico, proporcionando assim estudos em escala de bacia hidrográfica, ao contrário da Equação Universal de Perda de Solo (USLE) (WISCHMEIER; SMITH, 1978) que avalia a precipitação apenas de maneira geral utilizando um coeficiente que indica a erosividade da chuva, ou seja, o potencial da chuva em provocar erosão pontualmente, o que dificulta sua aplicação para bacias hidrográficas.

A MUSLE é um modelo de otimização de parâmetros para estimar a produção de sedimentos. Para formular os processos hidrológicos na produção de sedimentos, Williams e Berndt (1975), investigaram 778 eventos de chuva individuais distribuídos em 18 bacias hidrográficas, com áreas variando entre 15 ha a 1500 ha. A MUSLE foi

então desenvolvida com um coeficiente de correlação de 92% para a estimativa da produção de sedimentos numa base de chuva (SADEGHI; MIZUYAMA, 2007).

Os parâmetros considerados pela MUSLE são a perda de solo por evento individual de chuva, o deflúvio ou escoamento superficial direto (mm), a vazão de pico ($m^3 \cdot s^{-1}$), os coeficientes de ajuste para a calibração, a erodibilidade dos solos da bacia, a topográfica, a cobertura do solo e as práticas conservacionistas adotadas. É indiscutível a influência do relevo na erosão do solo, sendo o fator declividade (S) e o fator comprimento de rampa (L) os que mais afetam a taxa de erosão hídrica (MACHADO, 2002).

OS coeficientes de ajuste para calibração são considerados os fatores mais sensíveis da MUSLE na estimativa da produção de sedimentos. Na MUSLE original, os coeficientes são $a = 89,6$ e $b = 0,56$ (WILLIAMS, 1975). Em estudo realizado por Silveira (2015) os parâmetros foram calibrados a para bacia hidrográfica do Arroio do Ouro, obtendo os valores de $a = 0,511$ e $b = 0,809$.

Silveira (2015) descreve que a MUSLE considera o volume escoado superficialmente, a vazão de pico e adota dois coeficientes (a e b). Cabe salientar que assim como a USLE, a MUSLE é um modelo empírico e necessita da calibração de seus parâmetros, a fim de representar as condições reais da área em estudo. Para tal, é necessária a aplicação de informações hidrológicas da bacia na construção dos fatores da equação MUSLE, através da interação de equações. Para que a equação construída para a bacia hidrográfica seja validada, ou seja, seja representativa e condizente com a realidade é preciso aplicar testes de validação, como o proposto por Nash e Sutcliffe (1970). Esse critério estatístico foi desenvolvido especialmente para avaliar modelos hidrológicos, além da necessidade de realizar campanhas amostrais, a fim de comparar os dados coletados em campo, com aqueles obtidos a partir da simulação pelo modelo matemático.

A incorporação de ferramentas tecnológicas, como o sensoriamento remoto e Sistema de Informação Geográfico (SIG), aumentou significativamente a utilidade dos modelos de erosão do solo, melhorando a sua capacidade de previsão. O SIG armazena um banco de dados necessário para a modelagem da erosão e elaboração de mapas de áreas afetadas pela erosão. A detecção remota é, por exemplo, útil para estimar a cobertura da terra em grandes áreas geográficas, o que é um elemento crítico para modelar a erosão. A modelagem da erosão do solo envolve a integração

de processos hidrológicos complexos e variáveis em grandes áreas para compreender a magnitude da erosão do solo (BLANCO-CANQUI; LAL, 2010).

4.6 Veículo aéreo não tripulado

VANT é abreviação de Veículo Aéreo Não Tripulado, sendo a nomenclatura em português para UAV - *Unmanned Aerial Vehicle* ou *Unmanned Airbone Vehicle*, ou também empregado popularmente o termo drone, refere-se a qualquer veículo que possa voar e ser controlado sem, a necessidade de uma pessoa a bordo (EISENBEISS, 2009).

O interesse pelo VANT é anterior aos veículos tripulados, uma vez que em 1858 o francês Gaspard Felix Tournachon, sendo um pioneiro do sensoriamento remoto, utilizou um balão tripulado e obteve a primeira fotografia aérea conhecida, patenteando como aerolevanteamento. Este conhecimento possibilitaria obter informações de uma área de interesse de forma indireta, através de produtos de sensores remotos assemelhando-se ao levantamento diretamente em campo, além de amostrar áreas com maior rapidez (LONGHITANO, 2010).

Embora a utilização dos UAVs tenha começado durante a Primeira Guerra Mundial, não houve interesse de alguns Países no uso de aviões não tripulados. No final da década de 50, alguns drones foram fabricados para fins militares. A ideia de realizar missões no ar atrás das linhas inimigas sem danos ao piloto, intrigava os estrategistas de guerra e planejadores, e embora os esforços iniciais não fossem bem sucedidos, a Guerra do Vietnã e a Guerra Fria estimulou uma variedade de programas de desenvolvimento, o que levou ao reconhecimento de vários drones (NASA, 2006).

No Brasil, os primeiros levantamentos utilizando o VANT foram realizados na década de 1980 em pesquisas militares (MEDEIROS, 2007). Nos últimos anos o uso de veículo aéreo não tripulado vem se tornando cada vez mais comum, para fins de mapeamento, com elevada precisão espacial, podendo o levantamento ser realizado em tempo real (BOEING; CATEN; VITALIS, 2014).

Longhitano (2010) relata que o advento dos VANT's no aerolevanteamento trouxe inúmeras vantagens, como a redução dos custos de obtenção de imagens/fotografias aéreas e a maior flexibilidade de resolução temporal, para aquisição de imagens de alta resolução espacial. Considerando-se o exposto, ressalta-se que dentre os potenciais de aplicação da tecnologia de sensoriamento

remoto por VANTs, destaca-se a detecção, monitoramento, caracterização e mapeamento.

De acordo com Nonami et al. (2010) existem diversos modelos de VANT disponíveis no mercado, variando de acordo com suas características (Tabela 1).

Tabela 1 - Modelos de VANT e suas características de acordo com Nanomi et al. (2010).

Modelo	Características
Asa Fixa	Aviões não tripulados (com asas), que exigem uma pista de decolagem e de terras, ou lançamento catapulta.
Multirotores	Têm as vantagens de pouso capacidade e alta manobrabilidade. Úteis para muitas missões robóticas, especialmente em aplicações civis
Dirigíveis ou Balões	São mais leves que o ar e têm longa duração, voam em baixas velocidades, e geralmente são de grande porte.

Durante as últimas décadas, esforços significativos foram dedicados a aumentar a autonomia de voo e capacidade de carga, resultando em várias configurações de VANT, com tamanhos diferentes, níveis de resistência e capacidade. A Comunidade Internacional de Sistemas para Veículos Não Tripulados (UVS International Community) determinou cinco categorias de VANT (Tabela 2).

Tabela 2 - Categorias de VANT de acordo com UVS International.

Categoria	Peso (Kg)	Raio de Operação (Km)	Altitude (m)	Duração (Horas)
Micro	< 5	< 10	250	1
Mini	< 25	< 10	150/250/300	> 2
Curto Alcance	25 - 150	10 - 30	3000	2 - 4
Médio Alcance	50 - 250	30 - 70	3000	3 - 6
Grande Altitude e Longa Duração	> 250	> 70	> 3000	> 6

Fonte: adaptado de Eisenbeiss (2004)

Nos últimos anos, veículos aéreos micro, com dimensões menores que 15 cm, ganharam muita atenção em pesquisas de desenvolvimento de protótipos com tamanho e desempenho de insetos. O uso de VANT tem se tornado cada vez mais comum no meio civil com a mais variada aplicabilidade (NONAMI et al., 2010) .

Haarbrink e Eisenbeiss (2008) realizaram um estudo do quão precisos são os produtos fotogramétricos dos VANTs e concluíram que com os desenvolvimentos recentes na navegação moderna e observação da Terra resultando em plataformas de VANT confiáveis para levantamentos fotogramétricos e com produtos como ortofotos de 2 cm, mapas vetoriais tridimensionais com uma precisão de ponto relativo de 2 cm em XY e 4 cm de altura e MDS densos de aproximadamente 50 pontos por m².

Longhitano (2010) realizou um estudo da aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais, causados por acidentes com cargas perigosas. Grenzdörffer e Niemeyer (2012) executaram um trabalho de análise de propriedades de reflectância bidirecional da superfície das plantas, com um VANT composto de cinco câmeras. Roig et al. (2013) estudaram o uso de câmeras de baixo custo, acopladas a veículos aéreos leves, no estudo do aporte de sedimentos no Lago Paranoá. Almeida (2014) efetuou um estudo com uso de VANT em mapeamento aéreo com fins de elaboração de projetos viários. Vieira et al. (2015) aplicaram no mapeamento fitofisionomias de uma área no pantanal. Há uma diversidade de aplicações do VANT na agricultura de precisão, monitoramento florestal, aporte de sedimentos, controle de erosão, além do uso comum de mapeamento de áreas e objetos.

A fotogrametria através de VANT tem se tornado uma alternativa válida aos levantamentos geodésicos terrestres, especialmente para trabalhos de levantamento arriscado ao longo de rodovias e trilhos de trem e outros terrenos perigosos ou inacessíveis (HAARBRINK; EISENBEISS, 2008)

4.7 Fotogrametria

A fotogrametria é a ciência que busca obter informações confiáveis através de processos de registro, interpretação e mensuração de imagens. Etimologicamente, a palavra fotogrametria, vem do grego: *photon* [luz], *graphos* [escrita] e *metron* [medições] (WOLF, 1983). Conforme a International Society for Photogrammetry and

Remote Sensing (ISPRS) (2016), a fotogrametria é utilizada para a medição geral e interpretação de objetos, a partir de imagens, sequências de imagens e outras técnicas sem contato, fornecendo as coordenadas de pontos precisos e outras informações sobre objeto geométrico e semântica, para preencher bancos de dados espaciais e para a criação de cenas de realidade virtuais, com modelos textura vida real.

Coelho e Brito (2007) descrevem que o objetivo principal da fotogrametria pode ser descrito como a reconstrução de um espaço tridimensional, chamado de espaço-objeto, a partir de um conjunto não vazio de imagens bidimensionais, chamado de espaço-imagem. Outros autores relatam que a história da fotogrametria foi impulsionada pelo uso de balões e pipas, para a aquisição de imagens aéreas.

Em 1911, o austríaco Theodore Scheimpflug criou um método bem-sucedido de retificação de fotografias aéreas, iniciando um processo de utilização das fotografias, para mapeamento de extensas superfícies. Com o passar dos anos surgiram câmaras cada vez mais específicas para essa tarefa. Tais câmaras dispunham de mecanismos para imprimir nas fotos informações relevantes quanto ao sistema de coordenadas de imagem, aumentando ainda mais a precisão das medições efetuadas. A invenção do computador, na década de 40, deu início a uma transformação nos processos fotogramétricos, permitindo a ampla quantidade de cálculos necessários (COELHO; BRITO, 2007). Lima et al. (2010) e Tommaselli (2009) acrescentam que nas últimas décadas, o crescente avanço da área tecnológica, principalmente no que se refere ao desenvolvimento de métodos computacionais gerou um novo paradigma, a Fotogrametria Digital. Foi observada então a possibilidade da utilização de fotografias para geração direta de um mapa, isto é, quando devidamente tratada e com a adição de algumas informações que são relevantes na confecção do mesmo. Porém esse procedimento não é tão simples, uma vez que o relevo da superfície terrestre é descontínuo.

O objetivo principal da retificação para a fotogrametria aérea é gerar uma nova imagem vertical sem as distorções introduzidas pela altitude da câmera, durante a tomada da imagem. A imagem resultante poderá, inclusive, estar isenta dos erros de deslocamento devido ao relevo.

Meneses et al. (2008) citam que é fundamental a correção da projeção da imagem para serem retiradas informações confiáveis, as quais possam ser agregadas a dados de uma carta topográfica. O sistema de projeção das câmeras são

radioconcêntricas, ou seja, quanto mais distante do centro da fotografia, maiores serão as distorções. A principal técnica utilizada na atenuação das variações é a ortorretificação, no qual consiste em passar as fotografias de um sistema cônico para um ortogonal (denominada “*Ortorretificação*” e seu produto a “*ortofoto* ou *ortoimagem*”). Além da correção do sistema de projeção, este processo também possibilita a atenuação de outras distorções, como aquelas relacionadas com o relevo e com variações do momento de exposição, ocorridas durante o voo, eliminando as deformidades referentes à rotação da câmara, além de remover as distorções devidas ao relevo da área fotografada, que permite o cálculo de áreas e distâncias (LIMA; THOMAZ; SEVERO, 2010).

O primeiro processo para gerar a ortofoto é por meio do alinhamento das imagens correspondentes. Esse processo inicia procurando características e descritores nas imagens, e para facilitar a busca, são utilizadas as coordenadas obtidas pelo sistema *Global Navigation Satellite System* (GNSS). Com as características e descritores comuns encontrados para imagens correspondentes, são calculados os ângulos de rotação e translação para alinhar as imagens (RUIZ, 2001). A densificação de pontos de controle, que serão utilizados na correlação entre a imagem das fotos aéreas e o Sistema de Coordenadas do mapeamento, partindo de poucos pontos de coordenadas conhecidas nos dois Sistemas (foto e terreno), é denominado como Aerotriangulação (FONTES, 2008).

Mikhail et al. (2001) descrevem que o desenvolvimento da triangulação tem sido um fator importante na melhoria da viabilidade econômica do mapeamento fotogramétrico. Sem a triangulação, cada par estereoscópico (que são a representação em escala do modelo tridimensional do terreno) precisaria de dois horizontais e três pontos de controle verticais, mais postos de controle adicionais. Além disso, a determinação das orientações de todas as imagens produz simultaneamente um mapeamento mais preciso e consistente através de toda a região. O desenvolvimento do bloco de triangulação tem sido impulsionado pelos avanços no poder computacional. Algoritmos de modelos independentes reduzem o número de parâmetros necessários ao trabalhar com modelos em vez de imagens reais e simplificam os cálculos necessários.

No trabalho realizado por Roig et al. (2013), para o alinhamento das imagens, o horário de captura das imagens foi comparado com o registro de voo da aeronave, de modo a permitir a determinação das coordenadas X, Y e Z, de cada cena. Com

esta informação foi possível iniciar o processamento, a partir da detecção automática de pontos de amarração entre os pares de imagens. Com a amarração dos pontos nas imagens os pares estereoscópicos podem girar entre si, na região de sobreposição. Os pares estereoscópicos, consistem na união de duas imagens de uma mesma área, com ângulos de captura diferentes. Com a sobreposição dessas imagens é possível ter uma visualização em três dimensões do terreno, valendo-se da Estereoscopia.

A estereoscopia é um fenômeno natural que ocorre quando uma pessoa olha simultaneamente duas, imagens que foram obtidas de um mesmo local ou objeto, mas de pontos de vista diferentes, fazendo com que cada imagem seja vista com um olho. O resultado é a percepção da profundidade, ou terceira dimensão (FONTES, 2008). Sendo assim, a estereoscopia permite a visão tridimensional (visão estéreo), quando as imagens possuem uma sobreposição de pelo menos 60% lateralmente e 30% longitudinalmente.

Com os resultados obtidos das imagens resultantes da ortorretificação seja possível gerar o ortofotomapa é preciso utilizar o método de mosaicagem gerando um mosaico que permite uma vista ampla da área fotografada, causando uma impressão de continuidade, podendo ser entendida como uma única fotografia formada a partir da união de todas as outras (WOLF, 1983). Os mosaicos são divididos em: controlados, não controlados e semi-controlados. Os controlados são preparados a partir de fotografias retificadas na mesma escala. Para tanto, são usados pontos de controle, que são impressos em uma folha base sobre a qual são ajustadas as fotografias retificadas. Os mosaicos não controlados são preparados pela justaposição das fotografias, simplesmente pela observação de seus detalhes, sendo um método rápido para a elaboração de mosaicos que não necessitam de grande precisão. Já os mosaicos semi-controlados combinam características dos mosaicos controlados e não controlados. É possível gerar esses produtos a partir de fotografias aéreas não retificadas e pontos de controle, ou através de fotografias retificadas, porém sem pontos de controle. Esse tipo de mosaico é uma alternativa quando há necessidade de economia e precisão (WOLF, 1983).

Com o avanço tecnológico se popularizou os produtos gerados pelas ortofoto, sendo um deles o Modelo Digital de Superfície (MDS). O MDS pode ser definido como qualquer representação numérica para uma determinada superfície física do terreno (COELHO; BRITO, 2007). Através do método de estereoscopia é possível obter a

percepção de profundidade da imagem, na qual juntamente com as equações matemáticas que correlacionam as informações necessárias é possível obter o MDS.

O Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) está inserido nas Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional, homologado no decreto nº 89817 de 20 de junho de 1984. Se trata de um instrumento de avaliação que tem por finalidade verificar a qualidade geométrica, isto é, a precisão posicional e métrica dos elementos existentes no documento cartográfico, sendo que não está incluso os fatores temporal e temático. Santos et al. (2010) destaca que o decreto estabelece normas que regulamenta e classifica os documentos cartográficos quanto à exatidão (PEC) é aplicado da mesma maneira, independentemente do produto ser analógico ou digital. Neste decreto, entretanto, não existem definições sobre definição do tamanho da amostra para os testes de campo e indicação do tratamento estatístico, que melhor se adapte à estimativa da exatidão e precisão. O decreto em questão explica que o PEC possui um critério de classificação no qual a carta classe A é a que apresenta os melhores padrões de exatidão cartográfica planimétrica e altimétrica. A classe B tem padrões intermediários e a classe C os piores padrões (DANIEL, 2012).

As ortofotografias criadas automaticamente podem ser usadas para agricultura de precisão. A abordagem consiste em três etapas, recolha de dados a bordo, comunicação em tempo real com a estação terrestre e processamento de dados na estação terrestre (RIEKE et al., 2012). Os mesmos autores relatam que a maioria dos UAVs disponíveis está equipada com receptores GPS padrão de baixo custo o que proporciona uma precisão de posição absoluta de cerca de 2 a 15 m. Para uma melhor qualidade dos dados adquiridos seria o posicionamento GNSS habilitado para RTK, ou seja, um sistema de correção de posição do VANT no espaço durante o voo, gerando um aumento da precisão de posição de cerca de 1 a 3 cm, o que aprimoraria, não apenas o georreferenciamento direto, mas vários casos de uso em que é necessário um posicionamento de alta precisão.

O uso da fotogrametria com drones é fruto de um mercado que já acontece a mais de 100 anos realizado com aviões tripulados e com pilotos. O diferencial é o custo operacional reduzido em relação ao uso de aviões de grande porte, pois elimina os custos atrelados ao uso de aviões. Também outros fatores são a facilidade de operação e os softwares automatizados para gerar o produto final, a possibilidade de voar abaixo das nuvens, o maior detalhamento de dados do terreno e uma maior

acurácia posicional, o que vem validando o uso da referida tecnologia em estudos multidisciplinares.

5 Material e Métodos

5.1 Características da área de estudo

O trabalho foi desenvolvido na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro, localizada entre os municípios de Morro Redondo e Pelotas/RS. A bacia está inserida na região geomorfológica do Escudo Sul-Rio-Grandense, sendo considerada uma sub-bacia da bacia hidrográfica do Arroio Pelotas. O Arroio do Ouro é um afluente do Arroio Cadeia, que por sua vez é um afluente do Arroio Pelotas. O Arroio Pelotas possui sua nascente no município de Canguçu e a desembocadura no Canal São Gonçalo, no município de Pelotas, sendo a maior bacia hidrográfica do município de Pelotas (Figura 1).

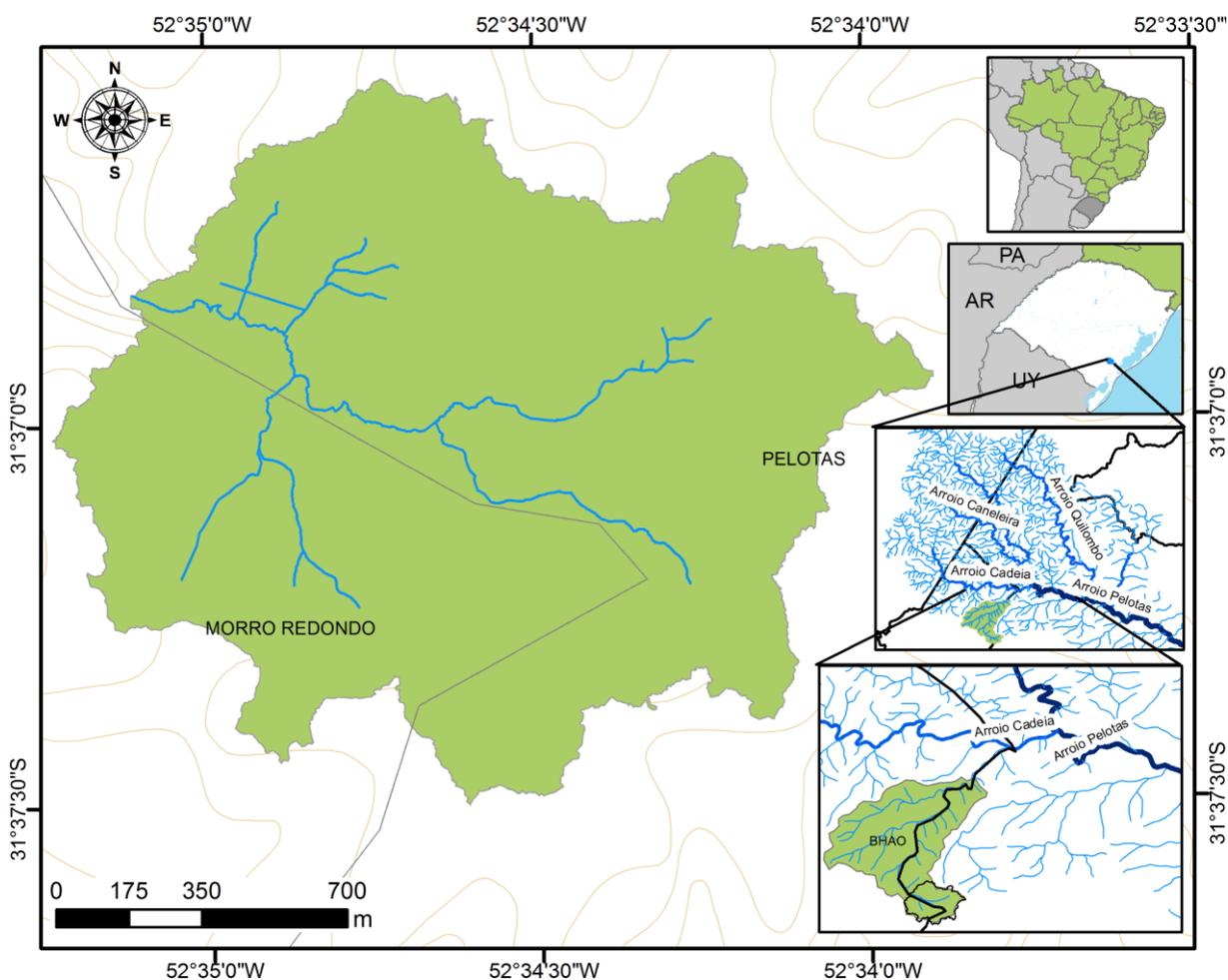


Figura 1 - Mapa de localização da bacia do Arroio do Ouro.
Fonte: IBGE (2013), HASENACK; WEBER (2010).

As classes de solo da região da bacia de acordo com Cunha et al. (1996) 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. O uso principal do solo é na agricultura em pequenas propriedades rurais, observando-se o cultivo de espécies como pêssego, milho e tabaco, além de atividades de pecuária leiteira e avicultura (BARTELS, 2015).

5.2 Aquisição de dados através de levantamento aéreo

Para o levantamento aéreo dos dados foi utilizado um veículo aéreo não tripulado, conhecido como microVANT Zangão V, sendo este um micro veículo aéreo remotamente pilotado, de plataforma modular, acoplado com uma câmera Canon PowerShot modelo ELPH110 HS, com sensor Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) e 16.5 pixels de resolução (Figura 2).



Figura 2 - MicroVANT de asa fixa Zangão V.

A qualidade da ortofoto gerada não está ligada diretamente a quantidade de pixel e sim a qualidade do sensor e da lente. No caso do mapeamento aéreo, a fotogrametria com drones, a calibração desta câmera influencia muito na qualidade geométrica do mapeamento. A quantidade de megapixel da câmera está ligada a área total do terreno que cada fotografia será capaz de mapear. A câmera utilizada neste trabalho, a Cânon PowerShot de 16,1 megapixel, resultando em imagens com 4608 X 3456, sendo que cada pixel teve como resolução 6 cm no terreno, isso quer dizer que cada imagem capturada cobria uma área de 276,5 x 207,4 m. Para avaliar a qualidade planimétrica dos produtos gerados foi empregado o PEC.

Antes do levantamento aéreo foi necessário realizar um reconhecimento de campo da área da bacia, que possui aproximadamente 221 ha e, assim, decidir os locais de lançamento do VANT. O equipamento possui uma autonomia de voo de 12 min, recobrando uma área de aproximadamente 100 ha, com velocidade média de 20 m.s⁻¹, a uma altitude de 200 m. Foi utilizado para o planejamento dos voos um software livre Mission Planner.

O levantamento aéreo foi realizado ultrapassando a área dos limites topográficos, para que fosse possível delimitar a bacia hidrográfica posteriormente. Após foi realizado o georreferenciamento das imagens obtidas de toda a área de interesse. O georreferenciamento das imagens consiste em registrar o par de coordenadas da fotografia, em coordenadas de referência, que modelam a superfície terrestre. Para esse procedimento foi utilizado o software GeoSetter beta, utilizando o arquivo de extensão “.log”, gerado pelo Mission Planner, após os voos.

Para o processamento das imagens, foi utilizado o software PhotoScan, da empresa AgiSoft. O PhotoScan possui um fluxo automatizado para processar as imagens, utilizando, para isso, algoritmos SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*) (LOWE, 2004). Este algoritmo engloba diversas metodologias relacionadas aos processos de identificação de pontos de interesse, geração de descritores e correspondência entre os pontos, ou seja, a visão computacional para detecção de pontos homólogos. Após as imagens serem carregadas no PhotoScan, um alinhamento inicial, automaticamente o software localiza a posição e orientação da câmera para cada foto e cria um modelo de nuvem de pontos esparsa. As imagens correspondentes são definidas pelas coordenadas espaciais, que são capturadas pelo sistema GPS da aeronave (RUIZ, 2001).

A precisão do sistema GPS acoplado no microVANT utilizado nesse estudo é considerada baixa, para uma melhor acurácia posicional foram coletados pontos de controle e de verificação na área. Para coletar estes pontos foi implantado um marco topográfico próximo ao exutório da bacia e fixado, com um erro sigma de 0.013 em latitude e longitude e 0.026 para a altitude, após 23 horas de levantamento com o receptor GPS Promark 500 geodésico L1/L2 (Figura 3).



Figura 3 - Marco topográfico próximo ao exutório da bacia e receptor GPS Promark 500

Durante a execução de cada voo foram colocadas 4 ou 5 placas de madeiras para serem pontos de controle para um processamento inicial das imagens da área. Após foram escolhidos 45 pontos na área para controle e verificação, de fácil identificação pelas imagens. Esses pontos foram inseridos no PhotoScan para o processamento das imagens, gerando um alinhamento otimizado.

No mapeamento aéreo com drones, o produto automático gerado é o modelo digital de superfície, ou seja, o modelo digital com os objetos acima do solo. Para obter o Modelo Digital de Elevação foi realizado o processo de filtragem da nuvem de pontos, interpolando os pontos por triângulos irregulares novamente, porém obtendo assim uma modelagem do terreno, com a forma da superfície do solo. Esta nuvem de pontos foi utilizada para gerar um MDE completo, sob a forma de uma malha triangular. O MDE foi utilizado para construir o ortomosaico e ambos os conjuntos de dados foram exportados para o formato Geotiff.

5.3 Caracterização fisiográfica

Com os dados gerados a partir do levantamento aéreo em ambiente SIG foi utilizado o software ArcGIS® 10 para a entrada de dados. Através do software foi realizada a caracterização fisiográfica da bacia em estudo, começando pela delimitação da mesma.

Após o delineamento da bacia foram avaliadas as seguintes características físicas: área e perímetro, fator de forma (K_f), coeficiente de compacidade (K_c), índice

de conformação (I_c), elevação média, mínima e máxima, declividade média, mínima e máxima da bacia, declividade do curso d'água principal, sinuosidade do curso d'água principal (S), densidade de drenagem (D_d), ordem dos cursos d'água e tempo de concentração (t_c).

O fator de forma (K_f) expressa a relação entre a largura média da bacia e o seu comprimento axial (Eq. 1).

$$K_f = \frac{\bar{L}}{L_{AX}} \quad (1)$$

Onde:

K_f = fator de forma (adimensional);

\bar{L} = largura média (km);

L_{AX} = comprimento axial, que é a extensão do maior eixo longitudinal da bacia (km).

O coeficiente de compacidade (K_c) é a razão entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual da bacia (Eq. 2), quanto mais próximo de um círculo, mais propensa a enchentes é a bacia.

$$k_c = 0,28 \times \left(\frac{P_{BH}}{\sqrt{A_{BH}}} \right) \quad (2)$$

Onde:

K_c = coeficiente de compacidade (adimensional);

A_{BH} = área da bacia (km²);

P_{BH} = perímetro da bacia (km).

O índice de conformação (I_c) expressa a capacidade da bacia em gerar enchentes, sendo a razão entre a área da bacia e a de um quadrado de lado igual ao seu comprimento axial (Eq.3). Quanto mais próximo da unidade, maior a propensão à picos de cheia.

$$I_c = \frac{A_{BH}}{(L_{AX})^2} \quad (3)$$

Onde:

I_c = índice de conformação (adimensional);

A_{BH} = área da bacia (km²);

L_{AX} = comprimento axial (km).

A sinuosidade do curso d'água principal (S) consiste da razão entre o comprimento do dreno principal e o comprimento do seu talvegue (Eq. 4). Este índice demonstra um fator controlador da velocidade de escoamento das águas. O valor de 1,5 divide os rios de alta (maior que 1,5) e baixa (menor que 1,5) sinuosidade (TEIXEIRA et al., 2012).

$$S = \frac{L}{L_t} \quad (4)$$

Onde:

S = sinuosidade do curso d'água principal (adimensional);

L = comprimento do curso d'água principal (km);

L_t = comprimento do seu talvegue (km).

A densidade de drenagem (Dd) é a relação entre o comprimento total dos cursos d'água e a área da bacia hidrográfica (Eq. 5).

$$Dd = \frac{\sum L}{A_{BH}} \quad (5)$$

Onde:

Dd = densidade de drenagem (km km⁻²);

$\sum L$ = comprimento total dos cursos d'água (km);

A_{BH} = área da bacia (km²).

A densidade da rede de drenagem (DR) é a relação entre o número total de cursos d'água e a área da bacia hidrográfica

$$DR = \frac{N}{A_{BH}} \quad (6)$$

Onde:

DR = densidade da rede de drenagem (km⁻²);

N = número total de cursos d'água;

A_{BH} = área da bacia (km²).

O tempo de concentração (tc) representa o tempo no 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 tc da bacia em estudo é a equação de Kirpich (Eq. 6), que depende do comprimento e do desnível entre a cabeceira e a seção de controle.

$$tc = 57 \times L^{1,155} \times H^{-0,385} \quad (7)$$

Onde:

tc = tempo de concentração (minutos);

L = comprimento do curso d'água principal (km);

H = desnível entre a cabeceira e a seção de controle (m).

Os valores de elevação mínima, média e máxima foram adquiridos mediante o MDE, com o recorte da bacia de cabeceira do Arroio do Ouro, através de ferramentas SIG. Os dados de declividade mínima, média e máxima também foram obtidos da mesma maneira.

Para realizar a análise da cobertura e uso do solo foi utilizado um ortofotomosaico, proveniente dos levantamentos realizados com o VANT. A classificação do uso do solo foi realizada manualmente, utilizando o software ArcGIS®. As classes de uso do solo foram definidas, a partir da mudança do uso do solo e a influência da cobertura para a erosão do mesmo.

5.4 Monitoramento hidrossedimentológico

5.4.1 Sessão de monitoramento

O estudo do comportamento hidrossedimentológico da bacia hidrográfica foi analisado através das curvas que relacionam a concentração ou descarga de sedimentos com a vazão. O monitoramento foi realizado, com a intenção de caracterizar a produção de sedimentos, considerando o maior número possível de eventos de precipitação, durante a ascensão e recessão do hidrograma. As principais variáveis monitoradas foram: vazão, concentração de sedimentos em suspensão e a precipitação.

Para o monitoramento contínuo e pontual de sedimentos em suspensão e nível d'água foi construída uma sessão, onde foram instalados uma régua linimétrica, um sensor de nível e um sensor de turbidez, ambos acoplados em um datalogger (Figura 4).



Figura 4 - Sessão de monitoramento construída na área de estudo na bacia do Arroio do Ouro.

Para o monitoramento da precipitação foi utilizada uma estação automática, modelo SL2000-PNV, já existente na área em estudo. O monitoramento teve início em agosto de 2016, realizando a coleta de dados a cada 15 minutos.

5.4.2 Monitoramento da descarga líquida

Através do monitoramento foi possível realizar o cálculo da estimativa de descarga líquida, que relaciona a área de drenagem e a velocidade com que a água passa pelo local. Para expressar de maneira apropriada o volume de água que escoou pela sessão, num determinado tempo, foi utilizado o método convencional de medição, através do equipamento FlowTracker Handheld-ADV (Acoustic Doppler Velocimeter), da empresa Sontek (Figuras 5A e 5B).

O FlowTracker Handheld-ADV mede correntes pelo método acústico, quando ondas acústicas emitidas ou refletidas por um objeto em movimento, com relação a um referencial. Possibilitam, assim, a medição da velocidade de algum objeto, e dispõe de um cálculo de descarga automática usando uma variedade de métodos internacionais, incluindo as normas ISO e do USGS (SONTEK, 2016).



(A)



(B)

Figura 5 - Equipamento FlowTracker durante medições em campo (A). Sensor do equipamento dentro da água durante medição (B).

Os dados pareados de vazão e cota foram empregados para desenvolver a curva-chave. O nível de água foi monitorado utilizando um sensor de pressão modelo SL2000-NV, através de leituras nas réguas linimétricas e dos registros do sensor no datalogger da estação. A partir dos dados obtidos foi construída uma equação de regressão linear (Eq. 8). Esta equação foi capaz de transformar os valores de altura da lâmina de água obtida através do sensor, em cota da régua linimétrica e assim aplicar na curva-chave.

$$\text{Cota} = (1,0365 \times (\text{sensor})) + 1,041 \quad (8)$$

Para construir uma curva que representasse de maneira adequada o deflúvio na sessão transversal foram realizadas diversas medidas em vários níveis d'água com o equipamento apropriado, obtendo-se a curva chave. O monitoramento foi realizado no período de setembro de 2015 a outubro de 2016, totalizando 42 medições. A sessão de monitoramento foi dividida em três níveis, o primeiro nível possui 19 cm de profundidade, enquanto o segundo e terceiro são separados por um degrau de 5 cm. Para realizar um melhor ajuste dos dados, a curva-chave foi dividida em dois segmentos, representando vazões com cotas inferiores e superiores a 19 cm (Figura 4).

Devido à dificuldade de realizar medições com cotas mais elevadas, especialmente pelos horários e rapidez com que ocorrem os picos de vazões bem como as características da bacia, para alguns eventos foi realizada a extrapolação da curva-chave. Valores com cotas acima de 87 cm extrapolam os limites da sessão, sendo assim os valores calculados para vazões acima de $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ subestimam a realidade (Figura 6).

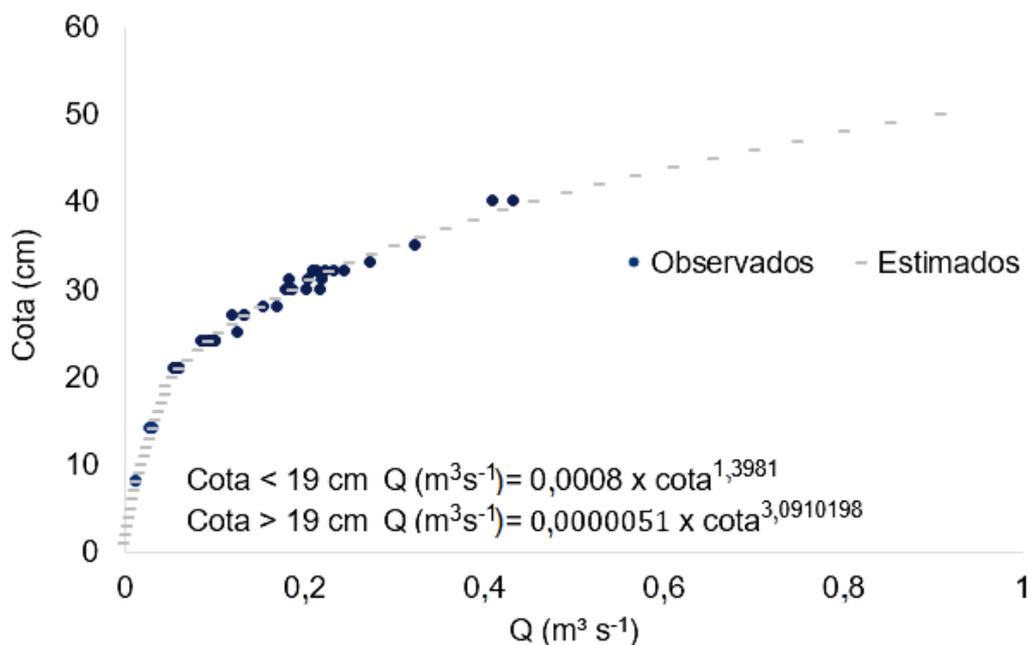


Figura 6 - Curva-chave de vazão da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

5.4.3 Monitoramento da concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss})

A concentração de sedimentos em suspensão varia em profundidade, transversalmente a linha de fluxo do canal e temporalmente. Para este estudo utilizou-

se o monitoramento automático através dos sensores de turbidez e o monitoramento manual, através das coletas de amostras durante eventos de precipitação.

No monitoramento manual foi adotado a técnica de igual incremento de largura, onde a sessão transversal é dividida em uma série de verticais igualmente espaçadas entre elas. As amostras foram coletadas a partir de um amostrador a vau SDH 81 (Figura 7), 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.



Figura 7 - Amostrador a vau SDH 81 para sedimento em suspensão.

Para o monitoramento automático foi utilizado o turbidímetro, onde primeiramente foi realizada a calibração do sensor com uma solução padrão empregada para verificar a eficiência do equipamento, em relação à variação da turbidez da amostra. Tal procedimento tem como objetivo 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 1000 NTU.

Para obtenção de um melhor ajuste da relação do sinal em mV e a solução com turbidez conhecida foram adotadas duas equações, uma com valores menores do que 100 mV (Eq. 10) e outra com valores maiores do que 100 mV (Eq. 11).

$$\text{NTU} = (-0,0126 \times (\text{mV})^2) + (3,1833 \times \text{mV}) - 65,525 \quad (10)$$

$$\text{NTU} = (0,0014 \times (\text{mV})^2) + (1,1078 \times \text{mV}) + 13,731 \quad (11)$$

Onde:

NTU = unidade nefelométrica de turbidez;

mV = sinal elétrico do equipamento (milivolts).

5.4.4 Procedimento analítico gravimétrico por filtração

As amostras de sedimento coletadas *in loco* foram devidamente identificadas e encaminhadas ao Laboratório de Solos e Hidrossedimentologia do curso de Engenharia Hídrica da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). Para a determinação da C_{ss} foi utilizado o procedimento analítico gravimétrico por filtração, cujo o processo envolve a separação e pesagem de um elemento ou um composto do elemento na forma mais pura possível (SHREVE; DOWNS, 2005), de acordo com as Normas da CPRM.

Após receber no laboratório as amostras oriundas da área em estudo, os recipientes foram limpos externamente, pesados e colocados em repouso por 24 hs, para a deposição das partículas de sedimento. Enquanto isso foram preparadas as membranas filtrantes de fibra de vidro, tipo 934-AH de porosidade, igual a $1,5 \mu\text{m}$ com diâmetro de 4,25 cm, sendo secas em estufa a 105°C , por 4 hs, colocados em um dessecador, durante o período da noite para resfriamento. Para realizar a filtragem foi montado um conjunto de filtração acoplado a uma bomba de sucção, conforme figura 8.



Figura 8 - Sistema de filtração acoplado a uma bomba de sucção.

Após filtradas as amostras, as membranas foram novamente secas a 105°C por 4 hs e colocadas no dessecador por mais uma noite para resfriamento. A pesagem das amostras e dos recipientes de amostragem foram realizadas com eles vazios e

secos, podendo assim obter o valor da C_{ss} em mg L^{-1} . Desta forma, comparando os dados medidos com amostrador e os dados do turbidímetro, foi possível estipular a equação de estimativa da concentração de sedimento em suspensão (Eq. 12).

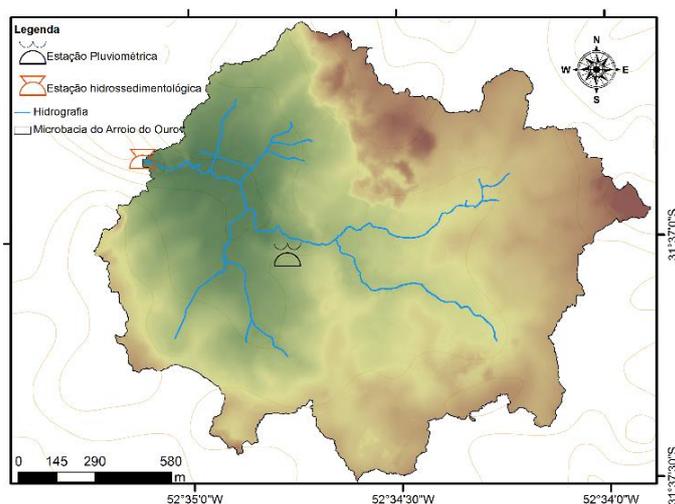
$$C_{ss} = (0,0066 \times (\text{NTU})^2) + (0,0266 \times \text{NTU}) - 1,0546 \quad (12)$$

Onde:

C_{ss} = concentração em sedimentos em suspensão (mg L^{-1}).

5.4.5 Monitoramento da precipitação

Os dados de precipitação foram obtidos da estação pluviográfica instalada próxima a área de estudo, pertencente a rede de monitoramento da bacia do Arroio do Ouro (Figuras 9A e 9B). Os dados coletados foram discretizados em intervalos de 5 min, no período de 30 de agosto a 11 de novembro de 2016.



(A)



(B)

Figura 9 - Mapa de localização da estação pluviométrica (A) e estação automática modelo Agsolver (B)

O período analisado abrangeu o intervalo de 30 de agosto de 2016 a 11 de novembro de 2016. Após a tabulação dos dados instantâneos, as séries foram organizadas em diferentes formas: dados diários, dados mensais e dados de eventos, assim para diferentes objetivos têm-se as informações organizadas da forma mais apropriada.

5.5 Equação universal de perda de solo modificada (MUSLE)

A Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE) é uma modificação da USLE, que é usada na estimativa do aporte de sedimentos na escala de bacias hidrográficas e por eventos individuais (Williams, 1975), dada pela seguinte equação:

$$Y = a \times (Q \times q_p)^b \times K \times LS \times C \times P \quad (13)$$

Onde:

Y = aporte de sedimento em um determinado evento (ton);

a e b = coeficientes de ajuste (adimensionais);

Q = volume de escoamento superficial do evento (m³);

q_p = vazão de pico do evento (m³ s⁻¹);

K = erodibilidade média dos solos da bacia (t h MJ⁻¹ mm⁻¹);

C = fator médio de uso e manejo do solo da bacia (adimensional);

LS = fator de topográfico (adimensional);

P = fator de práticas conservacionistas (adimensional).

5.5.1 Fator Q e q_p

O fator Q equivale ao volume de escoamento superficial direto (ESD) do evento (m³), que ocorre ao longo da inclinação da superfície e o fator q_p constitui a vazão de pico gerada pelo evento de precipitação avaliado (m³ s⁻¹). Assim sendo com os dados obtidos do monitoramento da vazão na sessão de controle (hidrograma) e da precipitação (hietograma) na área de estudo foram isolados os picos do hidrograma para realizar a separação do escoamento e, assim, obter a vazão referente ao escoamento superficial direto, além da vazão de pico atingida.

Para a separação do escoamento superficial direto e o escoamento de base foi utilizada a metodologia que considera uma reta crescente entre as inflexões A e C do hidrograma obtido durante o evento de precipitação, como pode ser observado na (Figura 10).

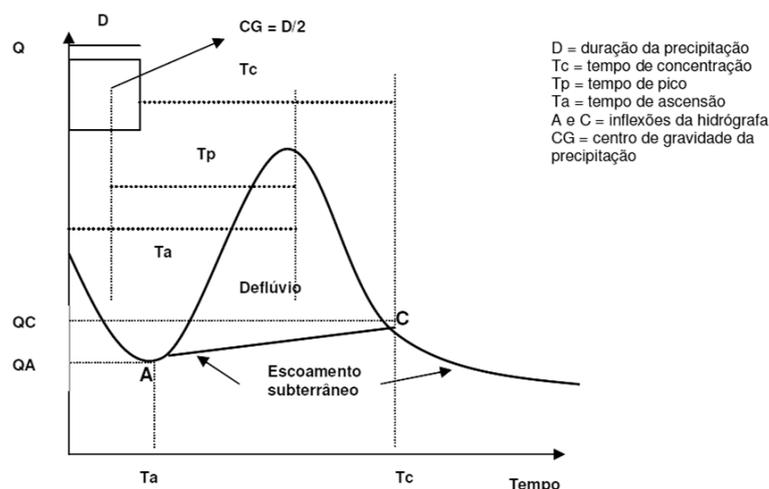


Figura 10 - Hidrógrafa e os seus principais componentes.
 Fonte: Mello e Silva (2013)

O procedimento consiste na observação de uma hidrógrafa isolada onde os pontos A e C podem ser determinados visualmente com base nos valores de vazão do ponto A, e analiticamente, no caso de C levando em conta a linearidade do escoamento de base e considerando a inclinação da reta AC. Determinados os pontos A e C deve ser traçado um segmento de reta unindo ambos os pontos, assim o deflúvio na parte superior do segmento corresponde ao escoamento superficial e aquele situado na parte inferior representa o escoamento de base. O próximo passo foi separar o escoamento superficial direto do subterrâneo com base no método dos trapézios, conforme demonstra a figura 11.

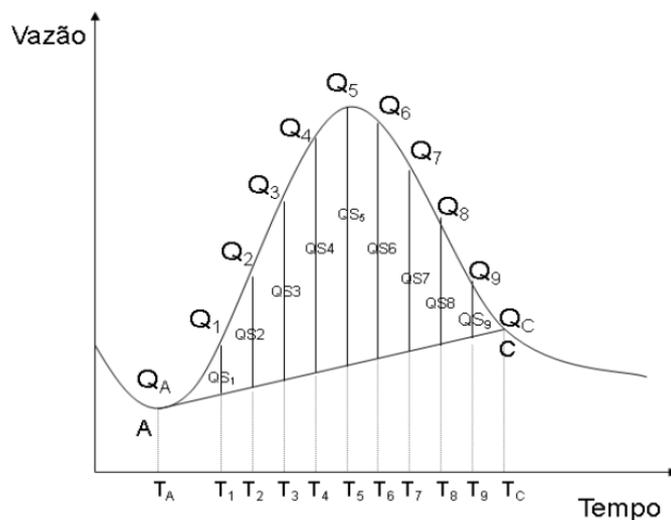


Figura 11 - Método dos trapézios para o cálculo do volume escoado superficialmente.
 Fonte: SILVEIRA (2015)

Onde:

Q_n = vazão total ($m^3 \cdot s^{-1}$);

Q_{Sn} = vazão superficial ($m^3 \cdot s^{-1}$);

T_n = intervalo de tempo;

A = início da separação do escoamento;

C = fim da separação do escoamento;

T_A = tempo de início do escoamento superficial;

T_C = tempo de término do escoamento superficial.

Feita esta divisão, deverá ser aplicada a equação 14 aos valores de vazão superficial para que seja obtido o volume escoado superficialmente, ou seja, o fator Q do modelo matemático MUSLE.

$$ESD = \sum_{i=1}^N (Q_{Si} \times \Delta t) \quad (14)$$

Onde:

ESD = volume escoado superficialmente m^3 ;

N = número de vazões que compõem o ESD da hidrógrafa;

Q_{Si} = vazão de escoamento superficial $m^3 s^{-1}$;

Δt = intervalo de tempo;

A vazão de pico do evento pode ser facilmente determinada considerando que os eventos foram monitorados. Desta forma, a vazão de pico corresponde ao ponto situado no extremo superior da hidrógrafa.

5.5.2 Fator K

O cálculo da erodibilidade dos solos (K) foi baseado na equação 15, desenvolvida por Roloff e Denardin (1994), onde são utilizados apenas parâmetros físicos do solo, como percentagem de silte, areia fina e permeabilidade codificada por Wischmeier et al. (1971). Estes parâmetros são capazes de esclarecer, em parte a capacidade de resistência do solo frente aos processos erosivos, sendo os mesmos encontrados no trabalho de Bartels et al. (2016)

$$K = 0,0049 \times P + 0,0000331 \times M_m^{0,5} \quad (15)$$

Onde:

K = erodibilidade média dos solos da bacia ($t \ h \ MJ^{-1} \ mm^{-1}$);

P = Fator de estrutura e permeabilidade do solo (adimensional);

M_m = teor de silte ($g \ kg^{-1}$) multiplicado pela soma de silte e areia fina ($g \ kg^{-1}$), sendo a análise granulométrica feita utilizando-se NaOH $1 \ mol \ L^{-1}$.

5.5.3 Fator LS

O fator LS é o fator topográfico que combinando o comprimento de rampa e grau de declividade. Desmet & Govers (1996) propõem uma metodologia de cálculo do fator L com a seguinte equação:

$$L_{ij} = \frac{(A_{ij} + D_{ij}^2)^{m+1} - A_{ij}^{m+1}}{D^{m+2} \times (\sin \theta_{ij} + \cos \theta_{ij})^m \times 22,13^m} \quad (16)$$

Onde:

L = comprimento da rampa (m);

A = área de fluxo acumulado (m^2);

ij = coordenadas da célula que a localiza no mapa da bacia;

D = resolução da grade de células (m);

m = coeficiente dependente da declividade (adimensional);

θ = declividade média da vertente ($m \cdot m^{-1}$).

Para o fator S, com base no estudo realizado por Oliveira et al. (2013, 2010) nos quais os autores realizaram uma análise de desempenho de equações indicam o uso da equação proposta por McCool et al. (1987, 1989) que também é utilizada por Renard et al. (1997) na Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE).

Os valores do expoente (m) da eq. 16 são calculados conforme eq. 17.

$$m = \frac{\beta}{(1 + \beta)} \quad (17)$$

Sendo β o quociente entre a erosão em sulcos e entre sulcos podendo ser calculado conforme a eq. 18 (MCCOOL et al., 1989).

$$\beta = \frac{\left(\frac{\text{sen } \theta}{0,0896}\right)}{[3 \times (\text{sen } \theta)^{0,8} + 0,56]} \quad (18)$$

Seguindo o cálculo do fator de declividade (S) foi calculado segundo a metodologia McCool et al. (1987).

$$S = 10,8 \times \text{sen } \theta + 0,03 \quad (S < 9\%) \quad (19)$$

$$S = 16,8 \times \text{sen } \theta - 0,5 \quad (S \geq 9\%) \quad (20)$$

Onde:

S = Fator de declividade (adimensional);

θ = ângulo da encosta (graus).

5.5.4 Fator C

Foi utilizada a Tabela 3 para a determinação do valor do fator C cujos valores obtidos para diversas culturas e usos do solo, com base no levantamento e mapeamento aéreo realizado com o VANT, obtendo-se o fator por meio da média ponderada para a área total da bacia.

Tabela 3 - Valores do fator C para diferentes usos do solo e culturas utilizados na modelagem para a bacia do Arroio do Ouro

Tipo	Fator C	Autor
Água	0	Silva (2004)
Banhado	0,005	Pimenta (1998)
Campo Nativo	0,042	Farinasso et al. (2006)
Construção	0,001	Farinasso et al. (2006)
Cultura Anual	0,4	Pimenta (1998)
Estrada	0,5	Pimenta (1998)
Fruticultura	0,01	Tomazoni e Guimarães (2005)
Mata Cultivada	0,1	Pimenta (1998)
Mata Nativa	0,012	Farinasso et al. (2006)
Rocha	0,01	Pimenta (1998)
Solo Exposto	0,4	Pimenta (1998)

5.5.5 Fator P

Na bacia do Arroio do Ouro foram utilizados os índices de práticas conservacionistas da tabela 4 propostos por Mata et al. (2007), Bertoni e Lombardi Neto (2010) e Souza et al. (2010) (Tabela 4).

Tabela 4 - Valores de P para uso e ocupação dos solos da região em estudo.

Tipo	Fator P
Água	0
Banhado	0
Campo Nativo	0,2
Construção	0
Cultura Anual	1
Estrada	0,5
Fruticultura	0,2
Mata Cultivada	0,04
Mata Nativa	0,01
Rocha	0
Solo Exposto	0

Fonte: Mata et al. (2007), Bertoni e Lombardi Neto (2010) e Souza et al. (2010)

Para determinação dos valores dos fatores K, LS, C e P foi utilizada a ferramenta “raster calculator” no software de SIG ArcGIS®, onde foram construídas expressões matemáticas conforme as equações pertinentes a cada fator. Cabe salientar que todas as informações inseridas em graus foram convertidas em radianos, em função do programa ArcGIS® trabalhar apenas com esta unidade.

Para avaliar a eficiência do ajuste e validar os valores foi utilizado o coeficiente estatístico e Nash-Sutcliffe (CNS) (NASH; SUTCLIFFE, 1970). Este coeficiente pode variar a partir de negativo infinito a 1, sendo 1 indicativo de um perfeito ajuste, quanto os pontos do gráfico de eventos observados versus eventos simulados se aproximam de uma linha com inclinação 1:1 (Eq. 09).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs} - Q_{est})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{est} - \bar{Q})^2} \quad (21)$$

Onde:

NS = coeficiente de Nash–Sutcliffe;

Q_{Obs} = vazão observada;

Q_{est} = vazão estimada;

\bar{Q} = vazão média observada;

n = número de medições de vazão.

6 Resultados e Discussão

6.1 Processamento dos dados do levantamento aéreo

Os levantamentos aéreos resultaram em 729 fotografias, cobrindo uma área de 477 ha, cada fotografia foi obtida com tamanho de 4608 X 3456 pixels e 180 dpi de resolução, resultando numa ortofotoaérea com um pixel de 6,13 cm e um modelo digital de elevação com 30 cm. Como as imagens obtidas pelo VANT tem GSD (*Ground Sample Distance*) com poucos centímetros, para manter a precisão nessa ordem os pontos de apoio devem ser medidos com procedimentos adequados (SILVA et al., 2014).

A figura 12 mostra a posição e o número de imagens sobrepostas no terreno, obtendo assim no levantamento aéreo o grau de sobreposição de imagens. Na área de estudo deste trabalho, conseguiu-se manter sobreposição superior a nove imagens para quase toda a região da área de estudo, havendo uma diminuição gradual de sobreposição no sentido das bordas e a região sul, todavia mantendo ainda a sobreposição mínima exigida para a restituição tridimensional.

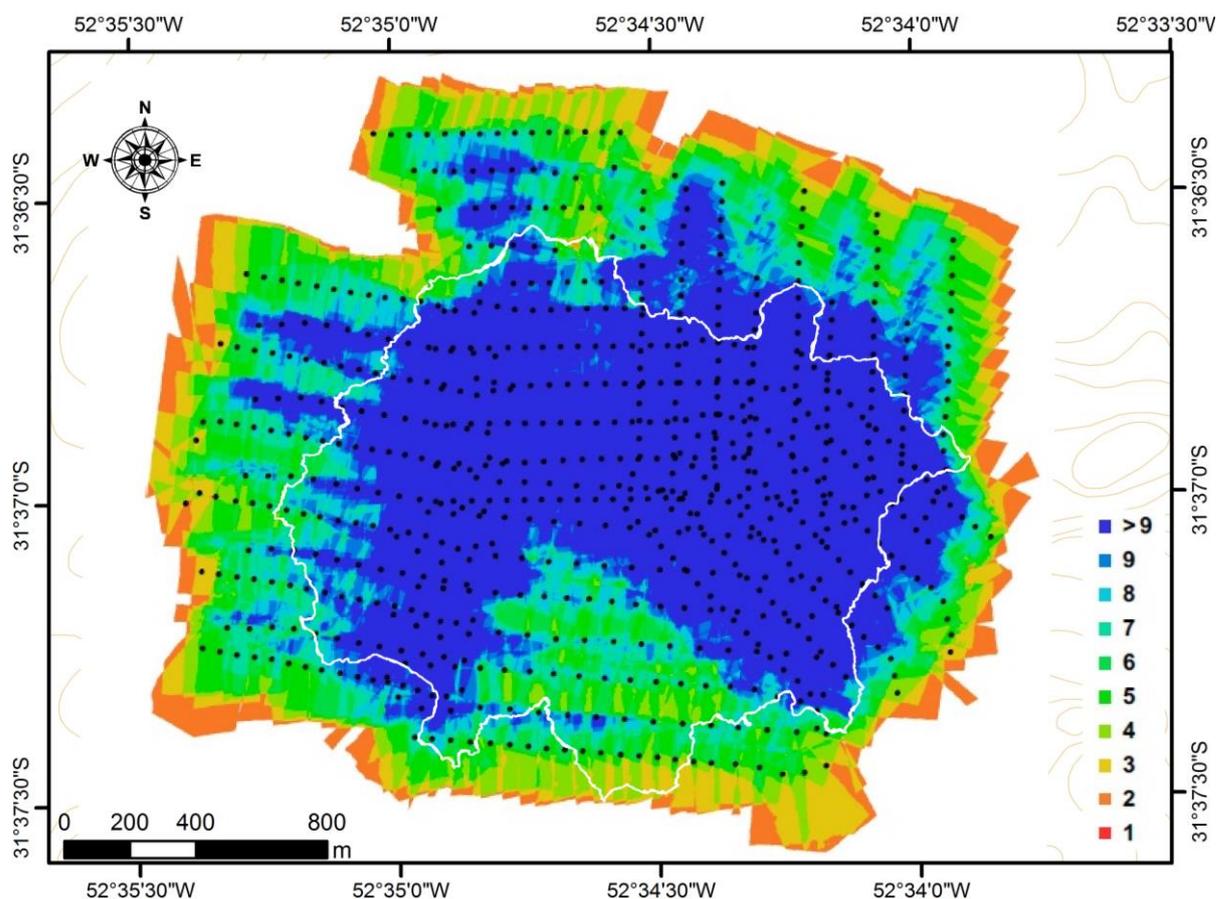


Figura 12 - Posição das imagens coletadas e número de imagens sobrepostas

Ferreira et al. (2013) relatam que para obtenção de bons resultados ao final do processo, é fundamental garantir um alto nível de sobreposição das imagens para toda a região de estudo. Quanto maior for a sobreposição entre as imagens, mais densa será a nuvem de pontos, o que favorece a obtenção de mosaicos e modelos de superfície mais precisos.

6.1.1 Pontos de controle

O resultado das coordenadas do levantamento de pontos de controle em campo, ajustadas à base implementada a partir de bases da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), bem como as coordenadas dos pontos de apoio fotogramétrico determinadas no processamento, com relação à base são apresentados na figura 13 e a tabela com a relação detalhada dos pontos encontra-se no anexo A dos apêndices.

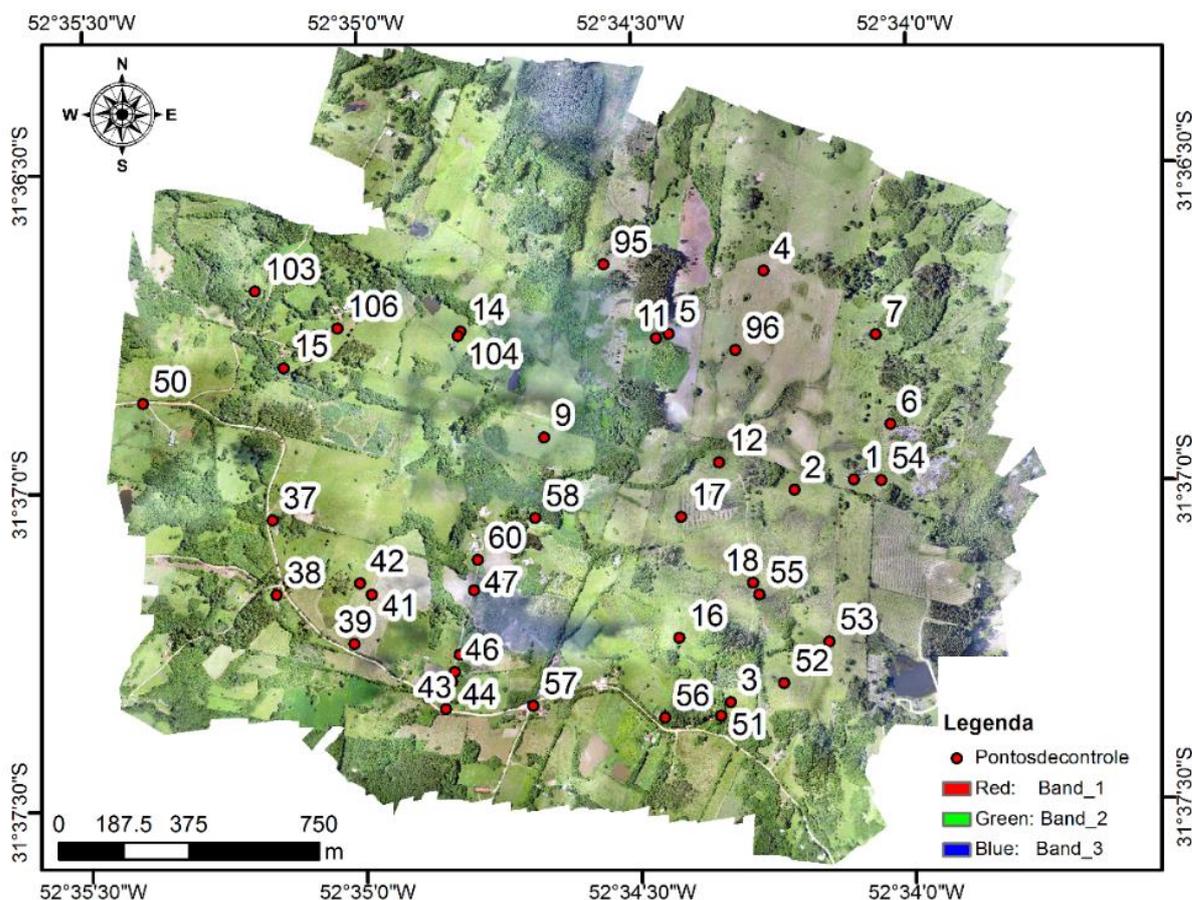


Figura 13 - Localização dos pontos de controle no terreno

Os relatórios fornecidos pelo software apresentaram solução fixa das ambiguidades para todos os pontos processados, desta forma pode-se considerar que a solução encontrada para cada ponto. Isso pode ser atribuído ao fato da utilização de linhas de base curtas – menos de 3 km - no processamento dos pontos de apoio fotogramétrico. Para análise de precisão dos pontos de controle, o software fornece no relatório uma tabela (anexo B dos apêndices) com os desvios padrão de cada ponto em relação aos eixos X, Y e Z e ainda o erro total da elipse e de pixels nas imagens.

Para enquadrar na normatização para classe “A” da PEC um produto cartográfico planimétrico deve possuir um erro menor que 0,5 mm, multiplicado pela escala do trabalho. Sendo assim, com a escala utilizada para gerar os mapas, o erro aceito seria de até 200 cm, com um desvio padrão total de elipse de pouco mais que 11 cm garante um mapeamento com precisão e exatidão mais do que satisfatória.

6.1.2 Ortomosaico

A figura 14 mostra o ortomosaico resultante da cobertura aérea com o VANT, obtida pelo software Photoscan.

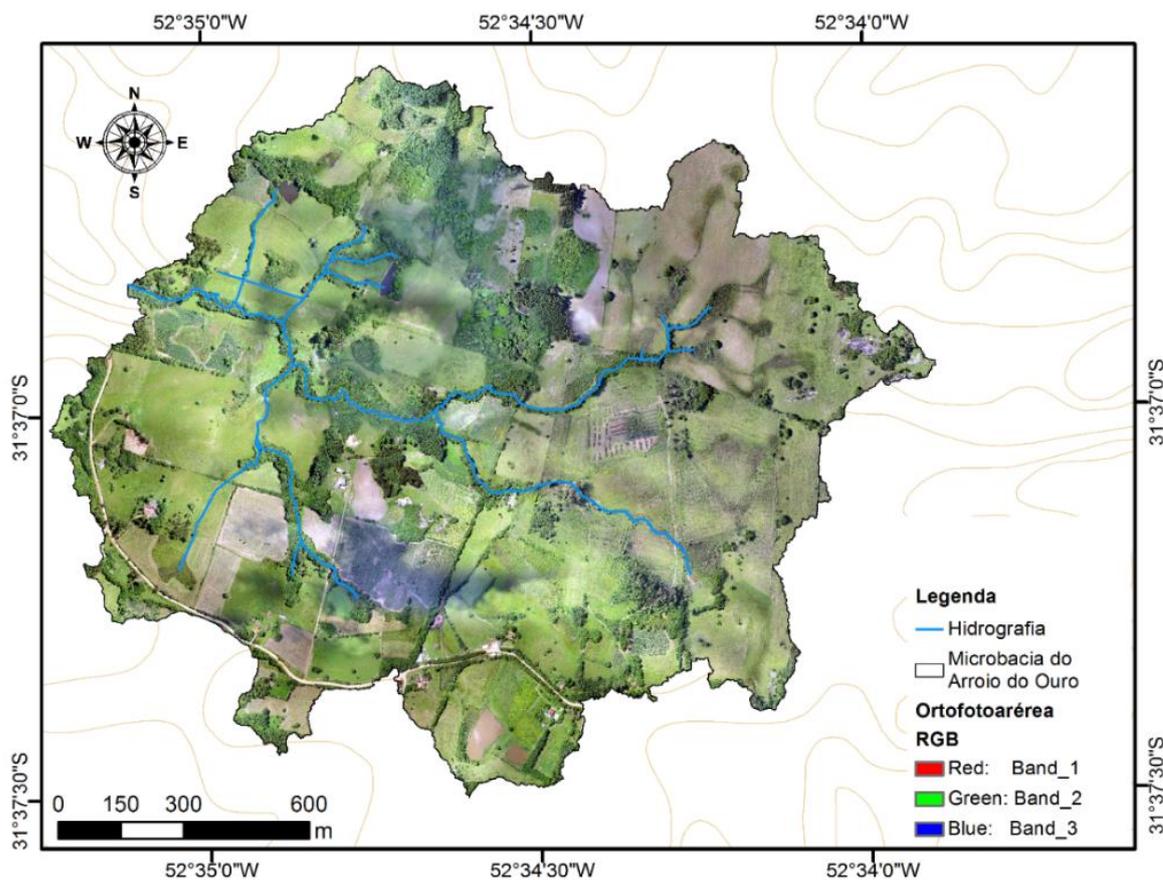


Figura 14 – Ortofotomosaico da bacia do Arroio do Ouro

A mosaicagem das imagens foi realizada de forma não supervisionada, ou seja, o software baseado na nuvem de pontos gerada e na aerotriangulação, fez a sobreposição das imagens. Na figura 15 observou-se em alguns locais uma maior sobreposição de imagens, sendo possível observar uma alta qualidade geométrica da ortofoto. Já a figura 15A foi possível visualizar a imagem de um veículo, identificando perfeitamente as suas características, como por exemplo a porta aberta. Na figura 15 B nota-se que o telhado da propriedade tem suas feições bem definidas, com ângulos retos, já nas figuras 15 C e D verifica-se uma pequena distorção nos telhados das outras propriedades. Comparando-se as imagens, observa-se que as figuras 15 A e B estão localizadas em regiões de alta sobreposição de imagens e as figuras C e D estão próximas a região com menor sobreposição. Pode-se atribuir essas distorções a falta de sobreposição de imagens, porém não se pode incumbir esses erros apenas a isto, outros fatores também podem influenciar, como a qualidade das imagens capturadas, imagens desfocadas e com borrões, zonas de arraste.



Figura 15 – Localização do veículo (A) e o detalhamento dos telhados das propriedades localizadas na bacia (B) (C) (D) através do ortomosaico

6.1.3 Modelo Digital de Elevação

De maneira geral a topografia da bacia em estudo possui uma amplitude hipsométrica de 89 m, variando de 241,5 m a 333 m de altitude. A observação dessa variação altimétrica é importante na análise dos processos de uso do solo e, ainda, possibilita identificar a configuração fisiográfica e sua relação com a dinâmica do escoamento superficial. A bacia pode ser dividida em duas regiões altimétricas, como observado na figura 16, uma região variando de 241,5 m a 270 m e outra de 280 m a 333 m, onde o relevo possui uma transição suave e, entre elas uma elevação rápida, com uma separação visualmente perceptível no mapa e em campo.

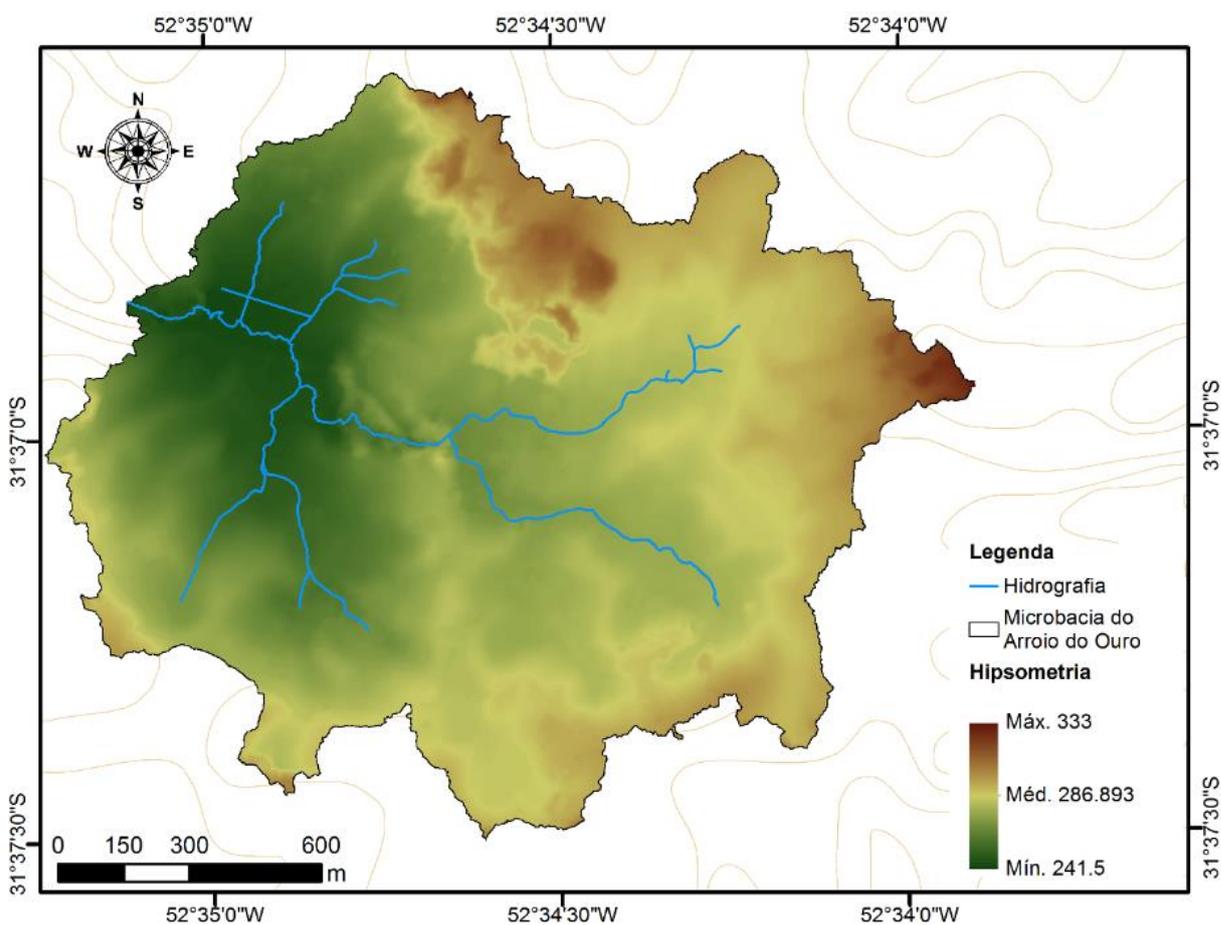


Figura 16 - Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro

As imagens coletadas pelo VANT possibilitaram a geração de nuvem de pontos com elevações, esses pontos interpolados resultaram no Modelo Digital de Superfície (MDS). A nuvem de pontos foi gerada no programa PhotoScan e interpolada pela técnica de redes de triângulos irregulares com função de primeira ordem no mesmo

programa, quanto maior for a sobreposição entre as imagens, mais densa será a nuvem de pontos, o que favorece a obtenção de mosaicos e modelos de superfície mais precisos. Hirschmuller (2008) destaca que uma nuvem densa precisa é um requisito importante para muitas aplicações, como a reconstrução 3D.

ROIG et al. (2013), Almeida (2014), Cândido et al. (2014) e Vieira et al (2015) alcançaram valores de resoluções espaciais de 10, 6,54, 23 e 14 cm, comparando com os valores obtidos neste trabalho é possível considerar que a resolução de pixel do mapeamento está dentre os padrões alcançados.

6.2 Caracterização fisiográfica

Com os resultados obtidos das características fisiográficas básicas da bacia do Arroio do Ouro, determinou-se uma área de 221 ha, com perímetro de 8,254 km, comprimento axial de 1,772 km e largura média de 1,163 km. Essa pequena área acarreta na maior concentração do escoamento superficial na bacia e no menor tempo necessário para que este escoamento atinja a seção de controle, comparado a bacias maiores. A forma da bacia influencia no escoamento superficial durante uma determinada chuva, bacias mais alongadas caracterizam tempo de escoamentos mais lentos, já bacias arredondadas apresentam tempo de resposta a chuva mais rápido.

O coeficiente de compacidade (K_c) encontrado foi de 1,557, indicando que a bacia tende a ser mais circular, favorecendo os processos de inundação do tipo cheias rápidas. Bacias hidrográficas cuja forma se aproxima a de um círculo, tendem a proporcionar a conversão do escoamento superficial para um trecho pequeno do rio principal; assim, quanto mais próximo a 1 for este índice maior a potencialidade de picos de enchentes (OLIVEIRA et al., 2010a; MELLO; SILVA, 2013).

Por outro lado, a bacia apresenta uma forma quadrada, comprovada pelo fator de forma (K_f) que quanto mais próximo da unidade 1 maior a probabilidade à enchentes, igual a 0,656 e o índice de conformação (I_c) de 0,7006, que indicam uma bacia com propensão média a enchentes. O fluxo bem distribuído ao longo de todo o canal principal produz cheias, com volume superior, quando comparada a uma bacia de forma alongada (OLIVEIRA et al., 2010a).

O tempo de concentração estimado foi de pouco mais de 21 min, esse é o tempo necessário para que toda a bacia participe do escoamento na seção de controle, ou seja, teoricamente, refere-se ao tempo necessário para deslocamento da

gota de chuva dos limites da bacia até à saída da mesma. A sinuosidade calculada para o curso d'água principal foi de 1,16, caracterizando cursos d'água como propensos a cheias de maior magnitude. Índices esses foram próximos aos valores obtidos por Santos et al. (2014), de 1,20 e 1,27, na análise de 2 microbacias no semiárido brasileiro, indicando canais com escoamento de velocidade mediana.

A hierarquia fluvial ou ordem dos rios é uma classificação que reflete o grau de ramificação ou bifurcação dentro de uma bacia. A rede de drenagem da bacia foi classificada, pelo método de Strahler, como de 3º ordem com 19 cursos de água. A densidade da rede de drenagem (DR) foi de 8,57 canais km⁻². Estes parâmetros retratam a grande disponibilidade de canais ou nascentes, possuindo um significado hidrológico claro ao demarcar o escoamento subsuperficial dos canais de escoamento superficial (BOGAART; TROCH, 2006)

Os resultados de densidade de drenagem Dd permitiram avaliar o nível de desenvolvimento do sistema de drenagem da bacia, bem como uma indicação da sua eficiência, apresentando um Dd de 2,521 km km⁻², indicando um sistema bem drenado. Segundo Villela e Mattos (1975) este índice pode variar de 0,5 km km⁻² em bacias com drenagem escassa a 3,5 km km² ou mais em bacias bem drenadas. Na bacia, a Dd elevada indicou ser uma área pouco permeável. A Dd possibilita identificar a propriedade de transmissividade do terreno e conseqüentemente algumas características de potencial erosivo. Valores baixos de densidade de drenagem estão geralmente associados a regiões de rochas permeáveis e de regime pluviométrico caracterizado por chuvas de baixa intensidade ou pouca concentração da precipitação (OLIVEIRA, 2011).

Os valores observando dos coeficientes e índices fisiográficos estão descritos na tabela 5, estes demonstram que essa bacia apresenta uma tendência a ocorrência de enchentes e picos de cheia conforme discretizados anteriormente.

Tabela 5 - Caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Caracterização física Microbacia	
Padrão de Drenagem	Dentrítico
Área da Bacia "A"	2,215 Km ²
Perímetro da Bacia	8,254 Km
Comprimento do rio Principal	1,976 Km
Comprimento de todos cursos d'água	5,550 Km
Comprimento Axial "Lx"	1,773 Km
Largura média "L"	1,163 Km
Coefficiente de Compacidade "Kc"	1,558
Fator Forma "Kf"	0,656
Índice de Conformação "Ic"	0,701
Densidade de drenagem "Dd"	2,5206 km km ⁻²
Declividade do Curso D'Água Principal	2,115 %
Tempo de concentração	21,77 min
Elevação Mínima	241,5 m
Elevação Média	286,893 m
Elevação máxima	333 m
Declividade média da bacia	18,282 %

A declividade é informação básica de topografia utilizada nos sistemas de avaliação do planejamento de uso da terra. O plano de informação de declividade foi gerado a partir das informações do MDE. As classes de declividade sugeridas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), seguem na tabela 6.

Tabela 6 - Classificação de declividades do relevo de acordo com EMBRAPA (2006) e distribuição da área de ocupação e da porcentagem de cada declividade da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Classes do relevo	Declividade (%)	Área (ha)	Área (%)
Plano	0 – 3	37,448	16,90%
Suave ondulado	3 – 8	59,054	26,65%
Ondulado	8 – 20	93,371	42,14%
Forte Ondulado	20 – 45	24,240	10,94%
Montanhoso	45 – 75	5,680	2,56%
Escarpado	>75	1,790	0,808%
	Total	221,582	100%

Os resultados obtidos pelo ARCGIS® condizem com o observado em campo, sendo uma área de relevo suave ondulado a ondulado, com 26,65% e 42,14%, respectivamente da área da bacia, conforme observado na figura 17.

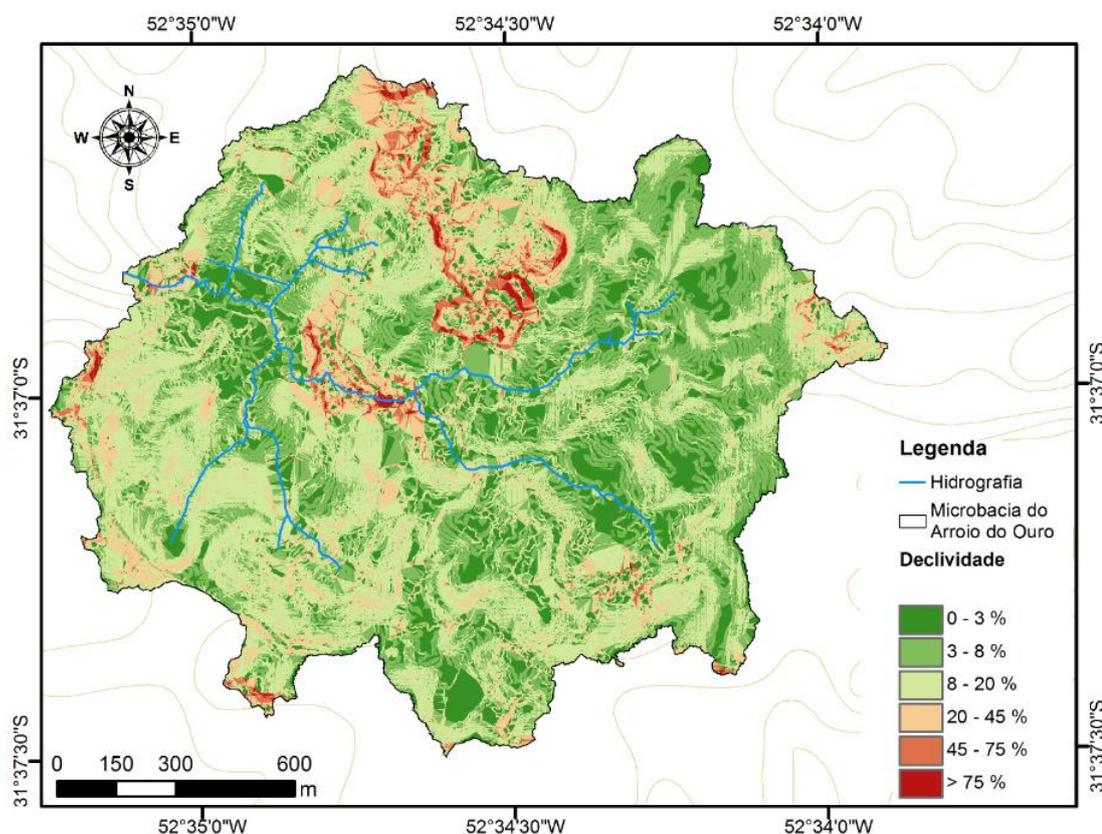


Figura 17 - Mapa de declividades da Bacia do Arroio do Ouro

Através dos resultados foi possível associar o processo erosivo aos fatores antrópicos quando comparado com o relevo. As áreas consideradas montanhosas e escarpadas tem uma área muito pequena, atingindo um percentual abaixo de 1 %, sendo quase insignificante sua influência no escoamento superficial da bacia. Os locais considerados com uma declividade montanhosa também são caracterizados por uma forte vegetação de mata nativa ou com cultivo nas áreas mais altas, sendo que o centro da bacia por superfície rochosa o que aumenta a velocidade do escoamento superficial.

O curso d'água principal tem uma ondulação média de 2% a 3% em toda a sua extensão, com algumas exceções no trecho de 960 m e 1250 m de distância da nascente, caracterizado por um local de terreno rochoso ao qual adquiri uma angulação de aproximadamente 30%, além de uma queda d'água de aproximadamente 5 m de altitude, com angulação entre 60° e 70° (Figura 18). Nessa área, o efeito do relevo é mais importante, sendo que a topografia determina um alto

potencial erosivo, proporcionando o esculpimento ativo das rochas pela água. Após isto o curso d'água assume uma forma de meandros até o seu exutório.

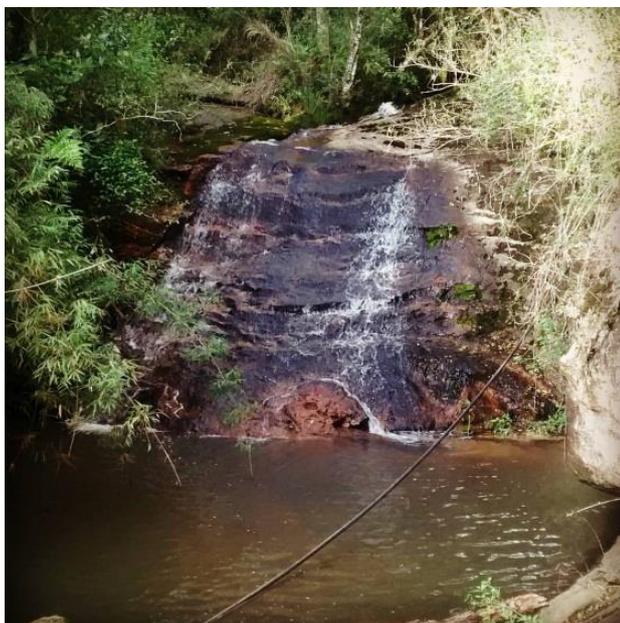


Figura 18 - Queda d'água localizada no centro da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro

6.3 Cobertura e uso do solo

As classes de cobertura e uso do solo foram definidas a partir da sua influência na infiltração e no escoamento superficial da água, e por consequência o potencial erosivo das mesmas (Tabela 7).

Tabela 7 - Distribuição da área de ocupação e da porcentagem de cada uso do solo da Bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

Tipo	Área (ha)	Área (%)
Água	1,344	0,61%
Banhado	13,790	6,22%
Campo Nativo	99,694	45,00%
Construção	0,428	0,19%
Cultura Anual	48,057	21,69%
Estrada	2,548	1,15%
Fruticultura	0,957	0,43%
Mata Cultivada	1,723	0,78%
Mata Nativa	51,868	23,41%
Rocha	0,819	0,37%
Solo Exposto	0,305	0,14%
Total	221,533	100%

Observa-se na figura 19, que algumas das nascentes do Arroio do Ouro transformam-se em banhados e açudes. Os campos que cobrem 45% da bacia são utilizados para a bovinocultura leiteira, sendo que algumas dessas áreas são provenientes de lavouras em fase de pousio, ou ainda, de áreas de mata cultivada. As matas nativas em sua maioria foram desmatadas, sendo mantidas próximas aos cursos d'água e algumas áreas com alta declividade. As lavouras 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. A mata cultivada é utilizada para extração de madeira de reflorestamentos (eucalipto e acácia negra), destinadas principalmente para carvoarias e também para geração de energia em estufas de secagem do fumo. As áreas de fruticultura encontram-se próximas as residências, servindo para o consumo familiar. As áreas de construção e rocha foram diferenciadas por ter um escoamento direto de água, sem absorção, em contrapartida as áreas de solo exposto foram evidenciadas porque o escoamento sobre a mesma varia pela intensidade da chuva.

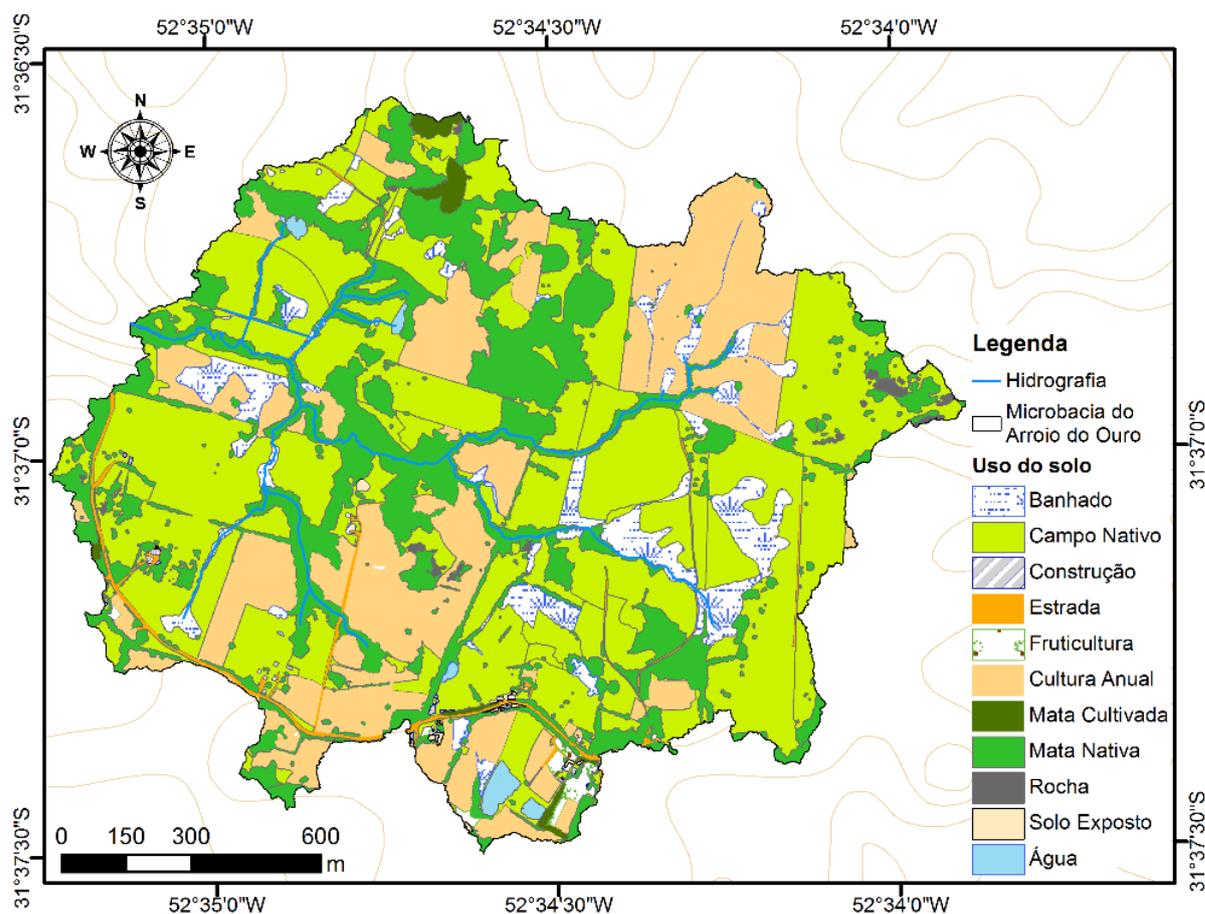


Figura 19 - Mapa de cobertura e uso do solo da bacia do Arroio do Ouro

A classificação e identificação da cobertura e uso do solo permite observar como os agricultores trabalham com as formas do relevo. Cunha (2016) descreve que

o grau de estabilidade que a cobertura vegetal garante ao solo e as atividades antrópicas realizadas são parâmetros a serem considerados, pois contribuí para a defesa de uma unidade de paisagem frente às consequências de processos erosivos. As consequências do uso e cobertura do solo sobre os recursos hídricos têm afetado o equilíbrio ambiental das áreas drenadas pelas bacias hidrográficas, assim sendo o monitoramento da mudança do uso de solo é de suma importância para o manejo da bacia hidrográfica.

6.4 Monitoramento hidrossedimentológico

6.4.1 Monitoramento das variáveis hidrossedimentológicas em escala semanal

Na tabela 8 estão dispostos os valores médios semanais para o monitoramento da precipitação acumulada, da vazão mínima, média e máxima e da concentração máxima de sedimento em suspensão, no período de monitoramento, que ocorreu entre 30 de agosto a 11 de novembro de 2016.

No início do monitoramento observou-se que a precipitação total foi de 148,8 mm, resultante de um período de chuva prolongada com eventos de baixa intensidade. Todavia a ocorrência de vários eventos de chuva num curto período de tempo, resulta em um solo saturado, o que permite um escoamento superficial de início rápido. Barros (2012) em seu estudo confirma que eventos sucessivos favorecem a saturação do solo aumentando os valores de vazão e produção de sedimentos. A C_{ss} máxima de 587,890 mg L⁻¹ foi decorrente do evento no dia 31 de agosto, no qual foi registrada uma precipitação total de 38,8 mm, mas com uma intensidade de precipitação baixa de 8,8 mm h⁻¹.

As semanas 4 e 5 foram caracterizados por um período de seca com ocorrência de baixas precipitações somando uma lamina de 8 mm. Através dos resultados foi possível observar na tabela 8 e na figura 20 que, conseqüentemente, os valores de vazão mínima, média e máxima estão próximos e baixos, assim como, os valores de concentração de sedimentos em suspensão estão entre os mais baixos.

Na semana 7 foi registrado um evento de menor duração, porém com a segunda maior intensidade de precipitação, onde uma chuva de 32.6 mm foi registrada no intervalo de tempo de 5,5 h. Isto é refletido na vazão do curso d'água e

na produção de sedimentos. Bartels (2015) relata que 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, o que torna o solo mais suscetível a desagregação pelo impacto da gota da chuva.

O valor mais alto de concentração de sedimento observado na tabela 8 e figura 21 coincide com o maior valor de vazão máxima na primeira semana de novembro. O evento de 1 de novembro, de alta precipitação acumulada, com alta intensidade e consequentemente altas descargas líquidas, ocorreram em uma época onde as lavouras estão em seu período inicial do ciclo da cultura, apresentando pouca cobertura vegetal no solo, com desagregação pelo impacto da gota da chuva e tendência a processos erosivos, pelo aumento do escoamento superficial. Destacando também que este evento foi responsável por quase toda produção de sedimentos da semana 10, sendo este o único evento ocorrido. Estudo realizado por Bartels (2015) na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro corroboram com os resultados encontrados, o autor observa 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.

Tabela 8 - Valores médios semanais da precipitação total, da vazão, da concentração de sedimentos em suspensão para o período do monitoramento no ano de 2016 na bacia de Arroio do Ouro

Sem.	Período	Prec. Total (mm)	Q (m ³ .s ⁻¹)			C _{ss} (mg.L ⁻¹)
			Mínima	Média	Máxima	Máxima
1	30/ago - 5/set	148,8	0,091	0,276	1,787	587,890
2	6/set - 12/set	14,4	0,038	0,120	1,777	335,007
3	13/set - 19/set	26,8	0,035	0,083	0,931	459,430
4	20/set - 27/set	0,4	0,018	0,036	0,045	43,131
5	28/set - 3/out	0,2	0,013	0,026	0,037	90,830
6	4/out - 10/out	18	0,009	0,027	0,070	49,811
7	11/out - 17/out	63,2	0,009	0,047	1,863	1308,937
8	18/out - 24/out	39,8	0,027	0,066	0,594	162,193
9	25/out - 31/out	36	0,023	0,073	0,210	85,018
10	1/nov - 7/nov	37,8	0,010	0,109	4,494	2529,662
11	8/nov - 11/nov	0,8	0,018	0,028	0,037	49,224

Sem.: Semana; Prec. Total: precipitação total; Q: vazão; C_{ss}: concentração de sedimento em suspensão.

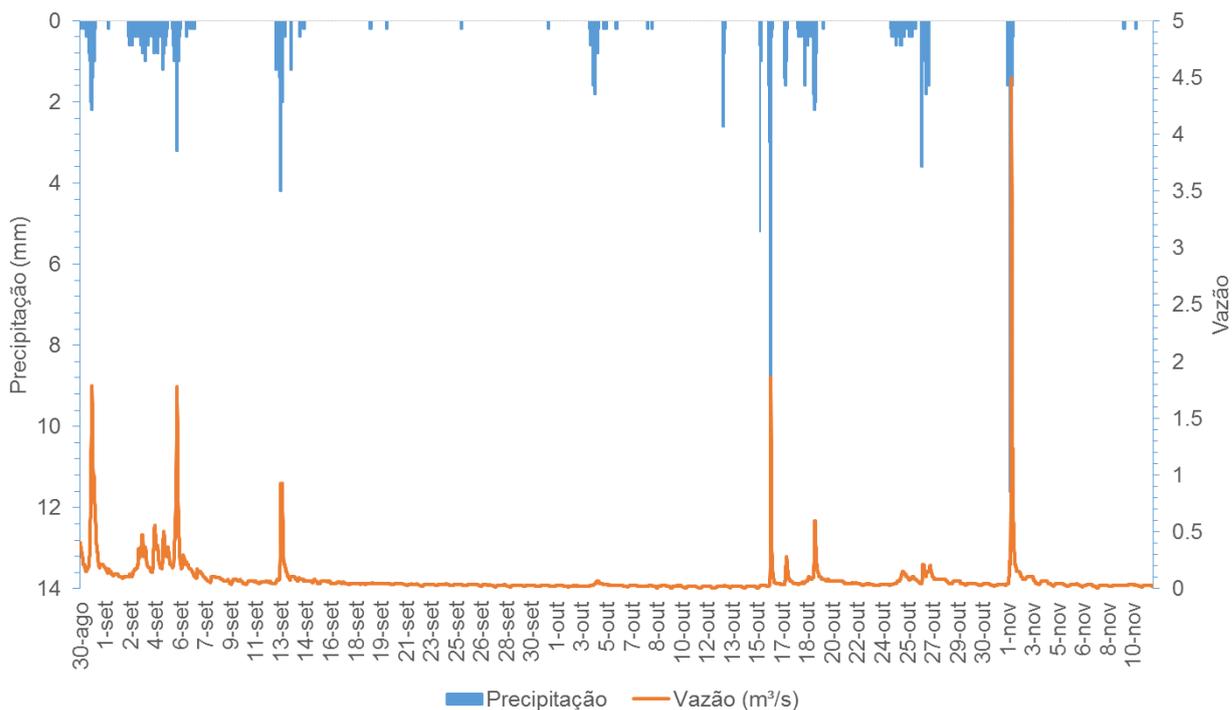


Figura 20 – Valores contínuos diários de vazão (Q) e precipitação durante o período de monitoramento da bacia do Arroio do Ouro.

6.4.2 Monitoramento das variáveis hidrossedimentológicas em escala de evento

Na tabela 9 encontram-se os dados de concentração de sedimento em suspensão, para a escala dos eventos monitorados. Observa-se que semanas com diferentes valores de precipitação total apresentam diferentes quantidades de C_{ss} máxima. Exemplificando, as semanas 6 e 9 apresentam uma C_{ss} máxima de baixa, apesar dos valores de precipitação da semana 2 serem inferiores ao da semana 6 a C_{ss} máxima é superior, e ainda valores de precipitação da semana 10, embora sejam próximos ao da semana 9, a C_{ss} máxima é superior caracterizando um evento de alta intensidade ocorrido durante a mesma. Isto reflete a necessidade da análise em escalas de eventos, pois o monitoramento na escala de eventos permite avaliar os danos e magnitudes com que eles ocorrem, sendo possível estipular medidas eficazes para diminuir seus impactos sob o sistema, como as cheias e estiagens (BARTELS, 2015).

Tabela 9 - Variáveis hidrossedimentológicas dos eventos monitorados na bacia do Arroio do Ouro.

Data	Duração	Prec. Total	$iP_{Máx}$	Qb_{Total}	Q_{STotal}	Q_{STotal}	Q_{Pico}	$Css_{Máx}$	Ps_{Total}
	horas	mm	mm.h ⁻¹	m ³	m ³	mm	m ³ s ⁻¹	Mg L ⁻¹	Mg
31/ago	18,75	38,80	8,8	16298,49	31577,84	14,26	1,79	587,89	7,28
02/set	30,25	36,00	2,4	17677,42	13621,44	6,15	0,47	61,02	0,89
04/set	13,25	14,80	3,2	10105,63	8326,21	3,76	0,56	41,67	0,43
05/set	12,25	13,60	4,8	12096,14	5012,14	2,26	0,51	67,68	0,54
06/set	12,25	29,40	12,8	12933,27	19907,17	8,99	1,78	335,01	3,98
13/set	6,5	30,40	16,8	7434,49	9586,42	4,33	1,00	459,43	2,82
16/out	5,5	32,60	40	3332,98	9394,18	4,24	1,86	1308,94	6,98
17/out	9,25	16,80	6,4	3228,76	2711,36	1,22	0,28	79,75	0,32
19/out	10,25	30,20	8,8	10247,38	5654,34	2,55	0,59	162,19	1,05
24/out	44,5	26,20	2,4	7088,02	7401,94	3,34	0,15	83,48	0,32
26/out	20,5	16,20	14,4	7925,09	5929,53	2,68	0,21	85,02	0,33
01/nov	11	37,80	46,4	7781,54	30128,17	13,60	4,49	2529,66	8,00

Preci. Total: Precipitação total; $iP_{Máx}$: intensidade de precipitação máxima; Qb_{Total} : escoamento de base total; Q_{STotal} : escoamento superficial total; Q_{Pico} : vazão de pico; $Css_{Máx}$: concentração de sedimento em suspensão máxima; Ps_{Total} : produção de sedimento em suspensão total.

Durante o período de monitoramento de 3 meses, foram discretizados as variáveis hidrossedimentológicas de 12 eventos de chuva-vazão-sedimentos. Os volumes precipitados para os eventos selecionados variaram de 13,6 a 38,8 mm, sendo o valor médio igual a 26,9 mm. Os eventos monitorados apresentaram ampla faixa de duração, variando de 5,5 a 44,5 h, sendo o valor médio igual a 16 h. Os valores estimados de escoamento superficial variaram entre 1,22 mm a 14,26 mm, mínimo e máximo respectivamente, e com valor médio de 5,6 mm.

Os eventos que exibiram menor Css máximo, variando de 0,32 Mg a 1,05 Mg, apresentando características de vazões de pico baixas, variando entre 0,15 m³ s⁻¹ a 0,59 m³ s⁻¹, com intensidades máximas de precipitação também consideradas baixas variando de 2,4 mm h⁻¹ a 8,8 mm h⁻¹, com exceção do evento do dia 26 de outubro, no qual a intensidade de precipitação chegou a 14,4 mm h⁻¹. A produção de sedimentos desses eventos variou de acordo com as características da precipitação e também pela época do ano, sendo que eventos ocorridos na primeira semana apresentaram Css máxima de 61,02; 41,67 e 67,68 mg L⁻¹.

No entanto eventos ocorridos nos dias 17,19, 24 e 26 de outubro apresentaram C_{ss} total próximas, todavia com características de precipitação com magnitudes diferentes. Beskow et al. (2009) incorporou a precipitação antecedente em modelos de escoamento superficial, melhorando o resultado destes como o observado na bacia hidrográfica do Ribeirão Marcela/MG.

Os eventos de maior expressão hidrossedimentológica ocorreram nos dias 31 de agosto, 16 de outubro e 1 de novembro, acumulando 7,28; 6,98 e 8 Mg em sedimento em suspensão, respectivamente, embora as datas de ocorrência não serem próximas, e ainda em períodos opostos de monitoramento as características da baixa cobertura do solo se assemelham, conforme o ciclo das culturas. Sendo o período de final de agosto e início de setembro época de senescência das pastagens atrelado ao pisoteio do gado, o que causa a diminuição da relação entre o número de macro e micro poros no solo, diminuindo assim a infiltração da água no solo e acarretando no aumento do escoamento superficial. O início do plantio das culturas de verão ocorre no final de outubro e início de novembro, deixando assim o solo exposto ou com baixa cobertura vegetal.

Em uma análise rápida a todos os hietograma, o hidrograma e o sedimentograma de todos os eventos monitorados foi possível observar a histerese entre a C_{ss} e a vazão, apresentando um aumento antecipado da C_{ss} em relação a vazão, variando no tempo conforme cada evento. Também pode-se observar na figura 22 que o evento do dia 24 de outubro foi exceção aos demais, apresentando um pico na C_{ss} após a onda de cheia. Este fato pode ter relação aos eventos anteriores de maior intensidade os quais retiraram o sedimento disponível na calha do curso d'água, assim como o novo evento de precipitação menos intenso os sedimentos transportados até a sessão de monitoramento tiveram um retardo temporal, caracterizando a chegada de sedimentos mais distantes (SEEGER et al., 2004).

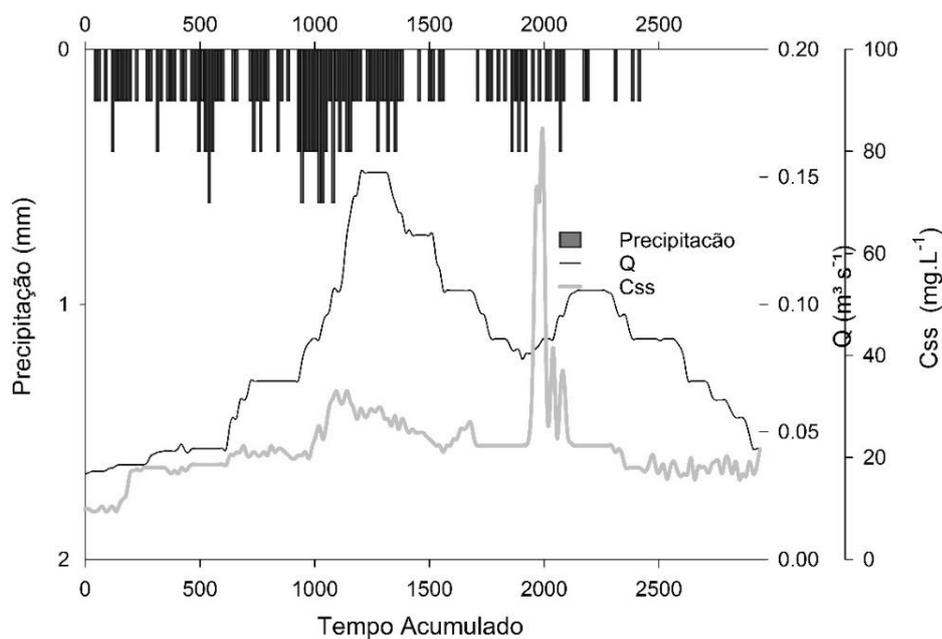


Figura 21 - Evento 9 dia 24 de outubro

Já os eventos do dia 31 de agosto e 6 de setembro, apresentados nas figuras 23 e 24, se assemelham, onde se observa um acréscimo mais rápido da C_{ss} no ramo crescente, um pouco tardio em relação ao crescimento da vazão. No entanto, no ramo decrescente observa-se um decréscimo rápido da C_{ss} em relação a vazão, condição esta que pode ser atribuída a disponibilidade de sedimentos e a capacidade de transporte do fluxo de acordo com Minella et al. (2011).

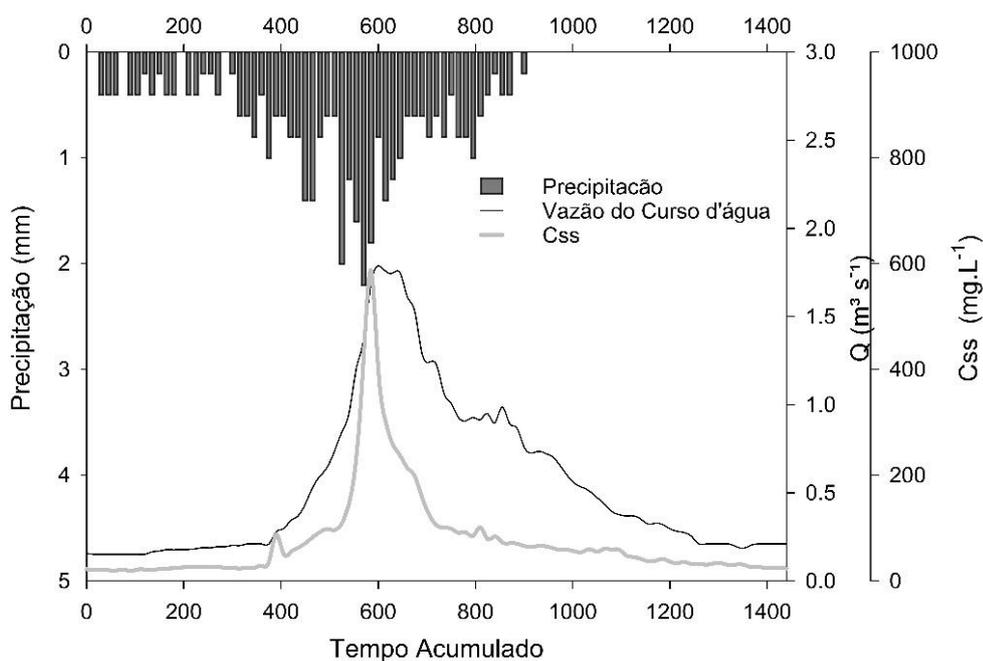


Figura 22 – Evento 1 dia 31 de agosto

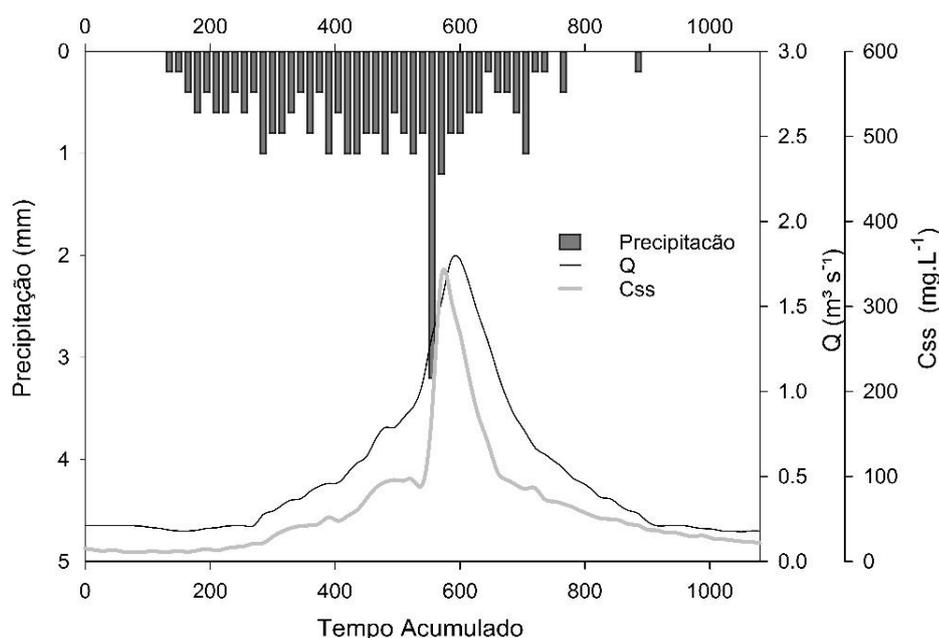


Figura 23 - Evento 5 dia 6 de setembro

Os dois eventos com maior intensidade de precipitação estão apresentados de forma detalhada nas figuras 25 e 26. Estes apresentam uma antecipação do pico de C_{ss} em relação ao de vazão, isto indica que a fonte de sedimento está perto da seção de monitoramento e disponível para escoamento rápido (BARROS, 2012), caracterizando o transporte do sedimento que está depositado na calha do curso d'água (MINELLA et al., 2011). No entanto o ramo decrescente da C_{ss} apresenta divergências entre eles, o evento do dia 16 de outubro apresenta no ramo decrescente uma redução rápida mais suave da C_{ss}, enquanto que o evento do dia 1 de novembro apresenta uma redução brusca da C_{ss} após ocorrer o pico. Tal fato, provavelmente aponta que neste primeiro evento o sedimento proveniente da calha fluvial acumulado proveniente de precipitações dos dias anteriores de baixo volume e intensidade. O mesmo ocorre com o segundo, a maior disponibilidade de sedimentos no evento do dia 1 de novembro, também pode ser atribuído às condições de cobertura vegetal. Nesta época, coincidente com a semeadura das culturas de verão, 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 à erosão (BARTELS, 2015).

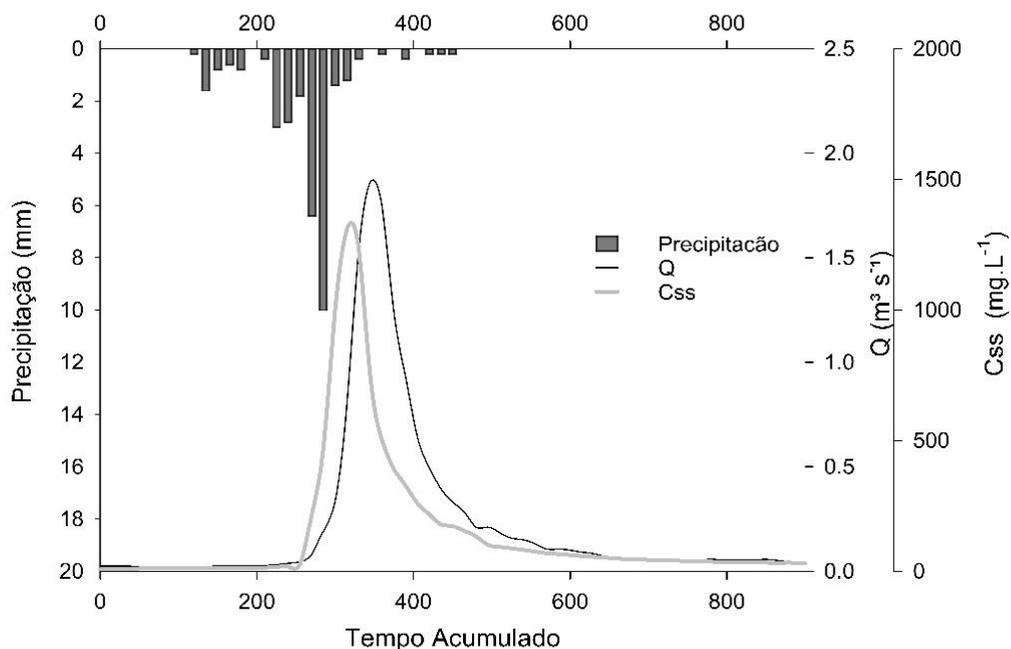


Figura 24 - Evento 7 dia 16 de outubro

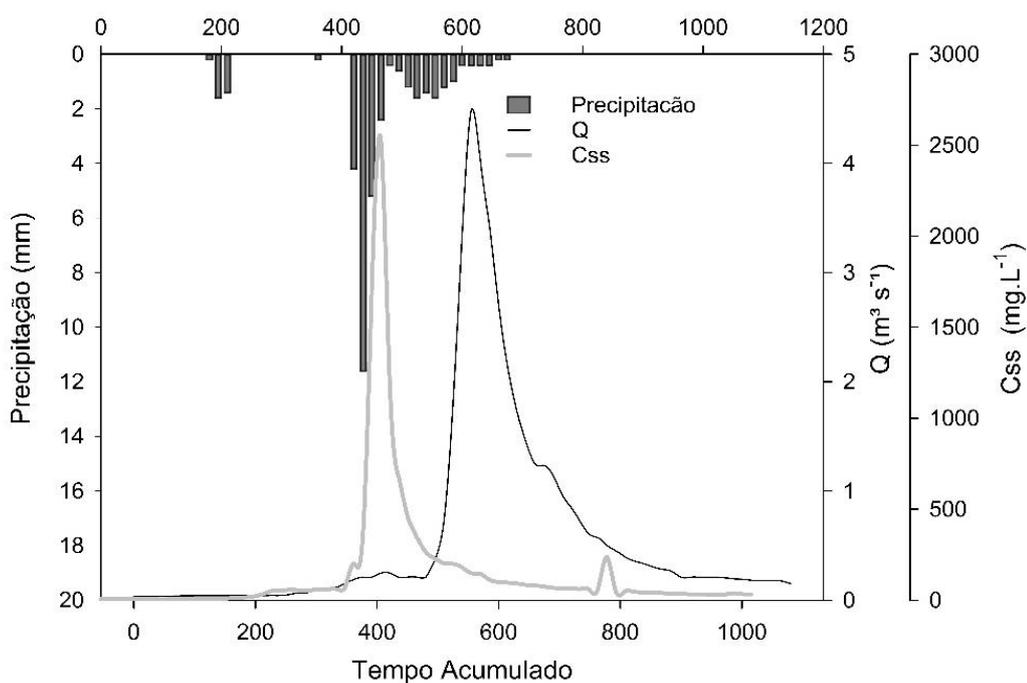


Figura 25 - Evento 11 dia 1 de novembro

6.5 Equação universal de perda de solo modificada (MUSLE)

Através da análise espacial tornou-se possível exibir no formato de mapa a distribuição dos valores associados aos fatores avaliados dentro da bacia do Arroio do Ouro. A distribuição espacial que corresponde a cada classe de intervalo do fator topográfico foi definida para uma melhor visualização com base nos trabalhos de

Beskow et al. (2009a) e Bueno et al. (2011) que apresentaram uma classificação da intensidade de vulnerabilidade à erosão hídrica.

Como é possível observar na figura 27 a bacia possui uma baixa vulnerabilidade à erosão hídrica em função do fator topográfico, onde mais de 90% da área apresenta baixa vulnerabilidade.

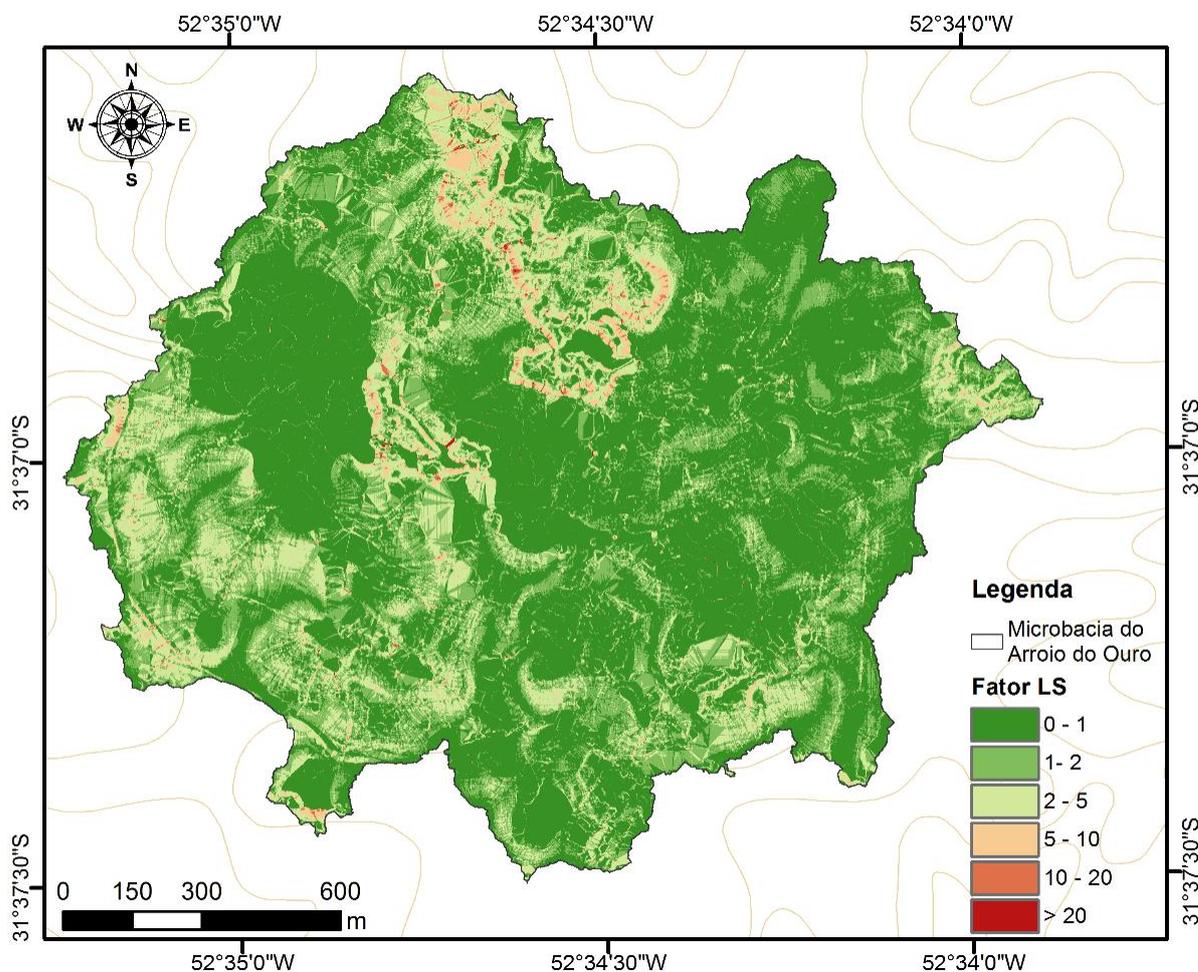


Figura 26 – Fator topográfico (LS) na bacia do Arroio do Ouro

A análise do fator topográfico é importante na aplicação de MUSLE (tabela 10), pois este parâmetro caracteriza a velocidade de escoamento superficial e, portanto, é um indicador de risco de erosão do solo em bacias hidrográficas (BESKOW et al., 2009b). OLIVEIRA et al. (2013) ressaltam que a declividade possui maior influência que o comprimento de rampa no cálculo do fator topográfico.

Tabela 10 - Classes de ocorrência do fator topográfico baseado.

Classificação	Classe Definida	Área (ha)	Área (%)
Muito Baixo	0 a 1	125,235	56,51%
Baixo	1 a 2	54,233	24,47%
	2 a 5	35,082	15,83%
Moderado	5 a 10	6,103	2,75%
Alto	10 a 20	0,809	0,37%
Muito Alto	>20	0,138	0,06%
Total	-	221,56	100%

A figura 28 apresenta o mapa fator de uso e manejo do solo (C), seguindo os valores tabelados anteriormente, caracterizando assim a bacia por uma alta cobertura vegetal, o que a torna mais resistente à ação dos eventos de chuva e, conseqüentemente, à ação dos processos erosivos.

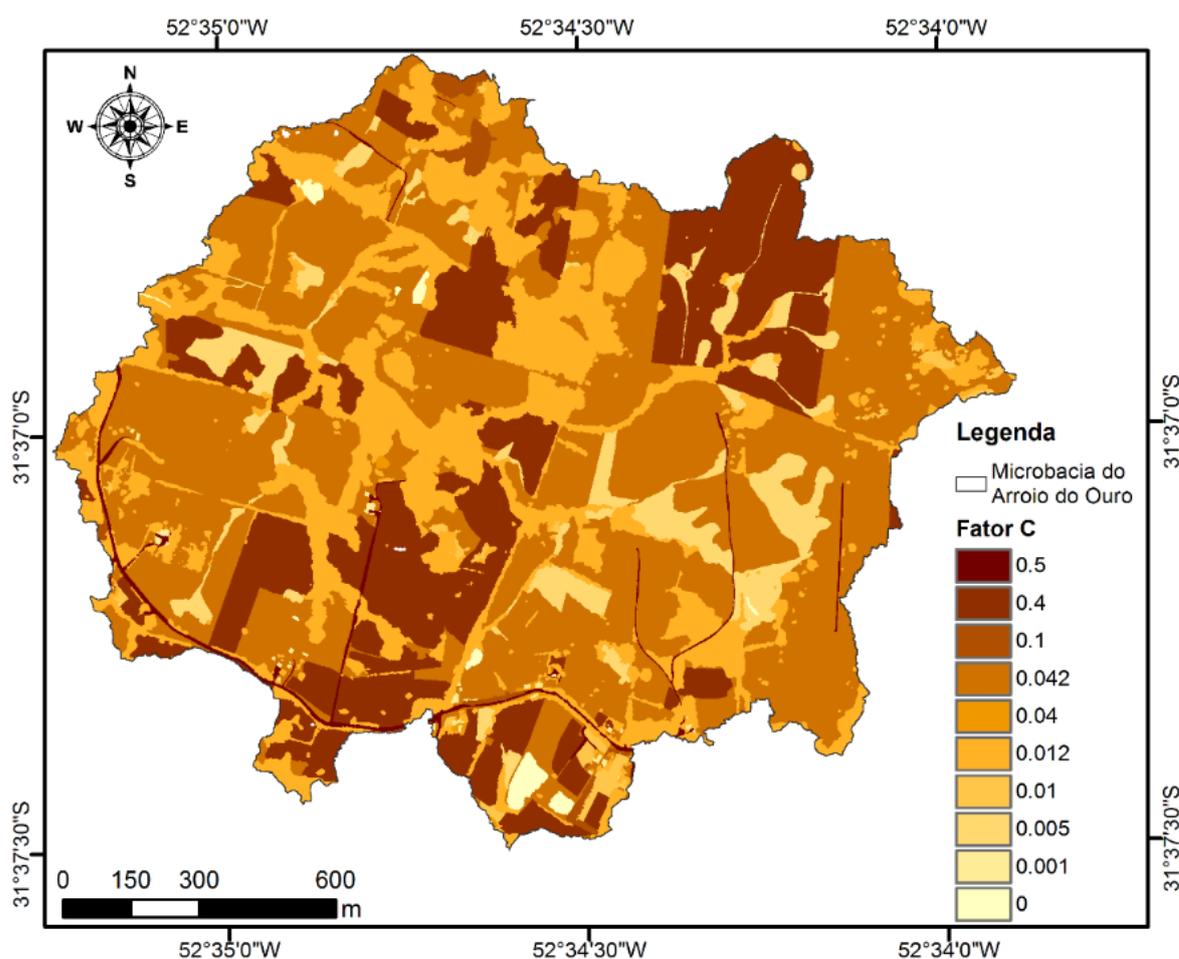


Figura 27 - Fator de uso e manejo do solo (C) na bacia do Arroio do Ouro

Para a determinação desse fator são considerados estágios definidos de desenvolvimento das culturas e suas influências na erosão do solo. O efeito das práticas culturais, como a rotação de culturas e o cultivo é, também, descrito pelo fator C (MACHADO, 2002). O fator C é uma taxa de perda de solo que varia durante os estágios da cultura, comparada à perda de solo na parcela padrão, durante o mesmo período (TIWARI; RISSE; NEARING, 2000). Segundo Neitsch et al. (2000), a cobertura vegetal afeta a erosão por reduzir a energia efetiva das gotas de chuva. As gotas de chuva que foram interceptadas pela cobertura vegetal podem readquirir apreciável velocidade, mas irá ser muito menor do que a velocidade final se não tivessem sido interceptadas.

A figura 29 mostra a distribuição dos valores associados às práticas conservacionistas ao longo de toda a bacia do Arroio do Ouro.

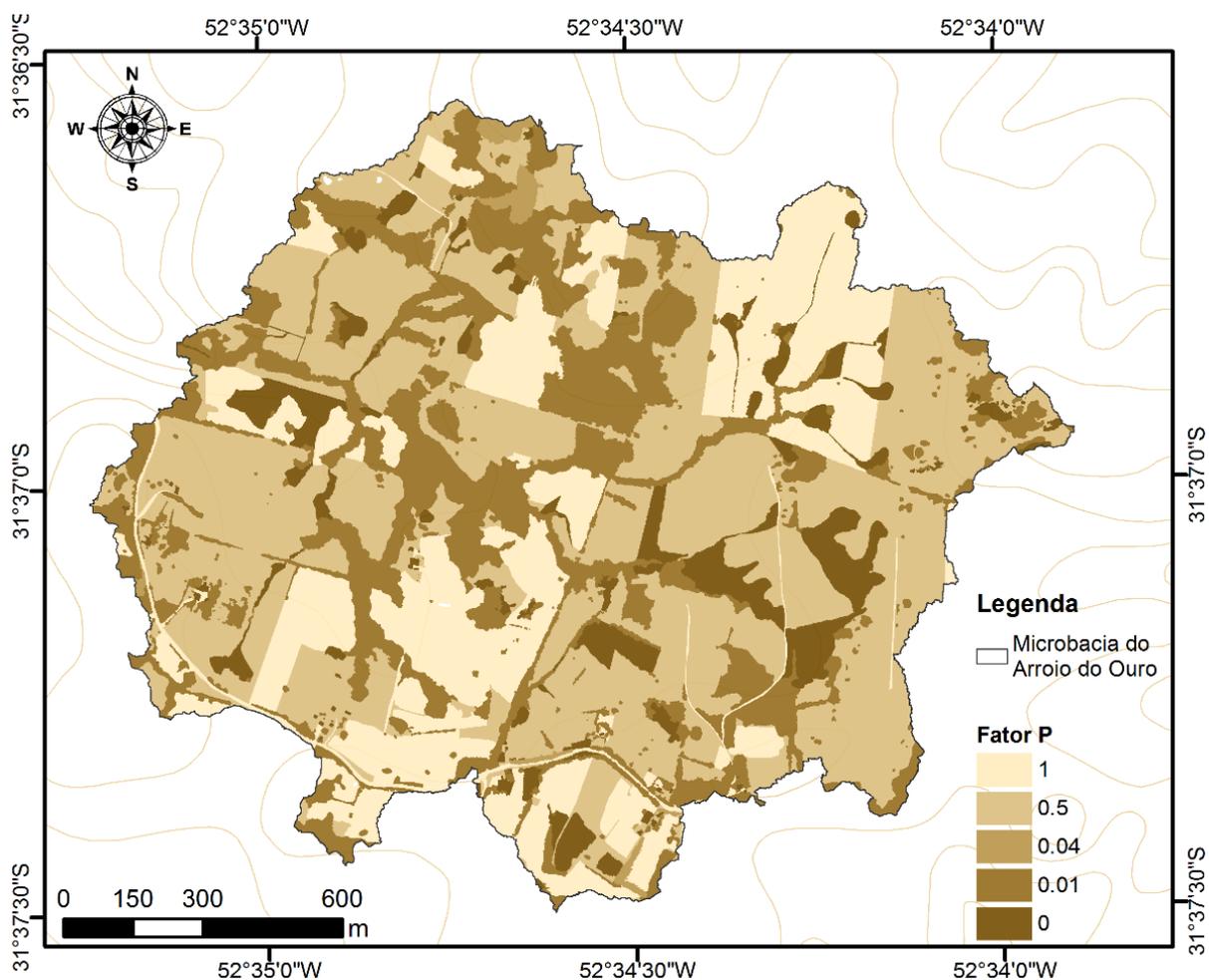


Figura 28 – Fator de práticas conservacionistas (P) na bacia do Arroio do Ouro

O fator P está fortemente relacionado com os diferentes tipos de uso e manejo do solo, de acordo com (NEITSCH et al., 2000) plantios em contorno e terraceamento fornecem uma proteção quase completa contra a erosão de chuvas de baixa a moderada intensidade, mas pouca ou nenhuma proteção contra chuvas intensas e severas que causam “quebras” nas linhas contornadas.

O fator P representa o impacto das práticas conservacionistas na perda de solo. Refere-se da relação entre a intensidade esperada de perda de solo com determinada prática conservacionista ou a intensidade quando a cultura está plantada no sentido do declive (morro abaixo). Uma área sem cobertura vegetal é geralmente mais suscetível à erosão do que aquela recoberta por vegetação, considerando ainda que o seu efeito dependerá do tipo e fase do crescimento da vegetação associada à sequência de culturas e ao manejo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010).

Desta forma, fica clara a importância da estimativa do fator P, principalmente em áreas onde são desenvolvidas práticas agrícolas, para que os dados resultantes não sejam influenciados por valores superestimados (SILVEIRA, 2015)

A partir das análises desenvolvidas com o uso da ferramenta SIG o mapa de solos disponível tem uma escala com pouco detalhamento, sendo assim aplicou-se valores médios de dados apresentados por Bartels et al. (2016), obtendo assim um valor único do fator de erodibilidade de $0,0174 \text{ t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Silveira (2015) concluiu sobre a possibilidade deste local possuir solos, cuja textura predominante é composta por areia fina e silte ou menor permeabilidade, pois estes são os parâmetros mais importantes para a quantificação do fator K, através da equação 15.

Com os dados dos fatores espacializados definiu-se um valor médio, computando cada um dos pixels, para representar a totalidade na bacia. Desta forma, foram alcançados os fatores K, LS, C e P (tabela 11). Os parâmetros a e b, como mencionado anteriormente, empregou-se os valores calibrados e validados por Silveira (2015).

Tabela 11 - Valores definidos para fatores da MUSLE à bacia do Arroio do Ouro

Fatores MUSLE					
<i>K</i>	<i>P</i>	<i>C</i>	<i>LS</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
0,0174	0,244	0,121	2,267	0,511	0,809

6.5.1 Estimativa da produção de sedimentos

Em relação à concentração de sólidos em suspensão na água, na Tabela 12 e na figura 30 são apresentados os resultados da simulação, assim como os valores observados no exutório da bacia. Entretanto, apesar da proximidade verificada entre os valores estimados e monitorados, cabe salientar que o modelo superestimou 25% os dados utilizados e subestimou 60%, apresentando um erro médio de 6% para 2 eventos, ou seja, apenas 15% dos eventos monitorados apresentaram uma estimativa próxima a realidade. A proximidade dos dados simulados com os dados medidos em campo tendo a média de erro atingido através da comparação foi de 36%.

Tabela 12 – Comparação dos valores da produção de sedimento medida e a estimada pela MUSLE.

Evento	Data	Ps_{Obs} (Mg)	Ps_{Est} (Mg) Calibrado	Erro relativo
1	31/ago	7,278	5,382	26%
2	02/set	0,885	0,929	-5%
3	04/set	0,431	0,715	-66%
4	05/set	0,537	0,438	19%
5	06/set	3,985	3,688	7%
6	13/set	2,819	1,281	55%
7	16/out	6.983	2.135	69%
8	17/out	0,324	0,166	49%
9	19/out	1,051	0,549	48%
10	24/out	0,320	0,226	29%
11	26/out	0,328	0,246	25%
12	01/nov	8,005	10,923	-36%

Ps_{Obs}: Produção de sedimento observada; Ps_{Est}: Produção de sedimento estimada.

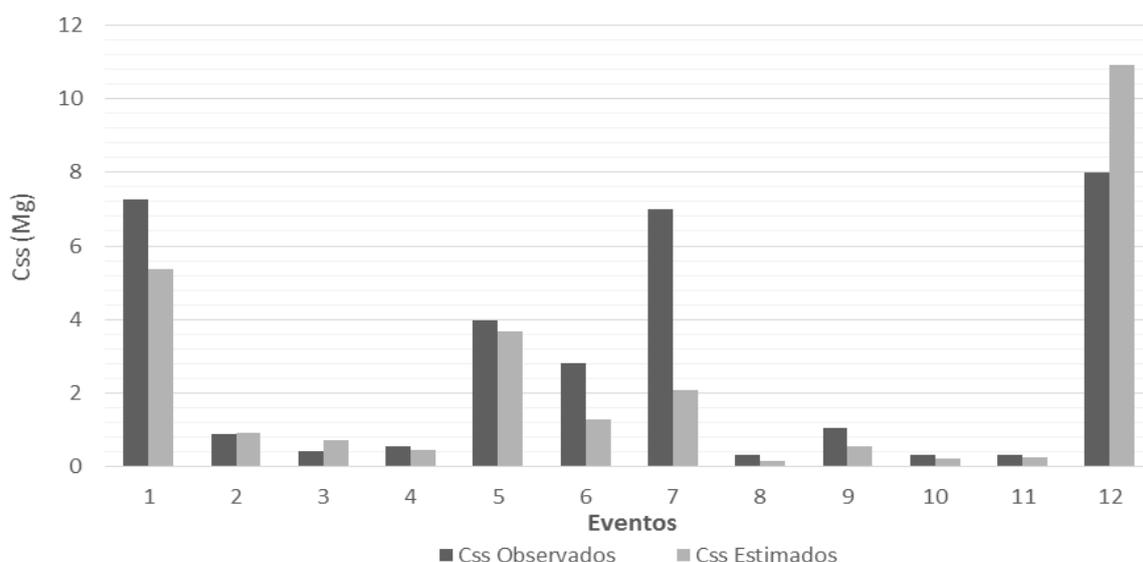


Figura 29 - Aporte de sedimentos observados em campo e estimados pela MUSLE com seus coeficientes calibrados.

Os eventos com vazões e pico próximas apresentaram uma produção de sedimento com valores distintos, este erro pode ter ocorrido pelo fato dos modelos de predição de perdas de solo embasados na USLE não levarem em consideração as condições de umidade antecedente, do solo na determinação do fator erodibilidade (AVANZI, et al., 2008). Os processos erosivos só passam a ocorrer quando a capacidade de infiltração da água no solo é menor do que a intensidade das chuvas. Isto significa que, com a retirada da camada superficial do solo (cobertura vegetal) ação do escoamento superficial é superior à infiltração, colocando-o em exposição e degradando o solo e a água como reflexos de uma série de intervenções antrópicas que vem ocorrendo ao longo de toda história da ocupação das bacias hidrográficas (ALMEIDA FILHO, 2008; SILVEIRA, 2015).

O evento de 16 outubro é subestimado, apresentado um erro de 70% na estimativa, este erro pode ser atrelado aos fatores de uso e cobertura do solo e práticas conservacionistas. Os fatores da MUSLE foram calculados a partir da análise da ortofoto adquirida da bacia e feito uma média geral, tendo em vista a mudança sazonal de uso e manejo do solo, sendo assim um valor médio que não considera essa sazonalidade pode caracterizar a subestimativa da alta incidência de sedimento no evento. Tal fato é refletido no gráfico de relação entre a produção de sedimento no evento e a calculada (Figura 30), onde obteve-se um coeficiente de correlação de 0.69 o qual indica uma dispersão dos dados em relação à média. Também o coeficiente de Nash da calibração foi 0,74 sendo considerado aceitável.

7 Conclusões

O modelo MUSLE representa a produção de sedimentos da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro, mediante a utilização de características determinadas na própria bacia e a calibração de seus coeficientes;

O uso dos coeficientes a e b calibrados na equação MUSLE tornou-se capaz de representar adequadamente o aporte de sedimentos na bacia do Arroio do Ouro. Os erros encontrados devem-se ao fato de se tratar de uma bacia rural, com variação sazonal do uso e manejo do solo. Assim, é sugerível um acompanhamento dessas mudanças e uma variação no valor médio os fatores C e P, em estudos futuros.

A utilização do VANT na obtenção de dados geospaciais mais precisos e detalhados permite a construção de um MDS e MDE consistente, bem como sua relação com modelos matemáticos com um modelo de perda de solo ou produção de sedimentos mais consistentes. Aconselha-se para estudos futuros voos sazonais para um monitoramento preciso das mudanças de uso e manejo do solo.

Referencias

- AB'SÁBER, A. N. Problemas de mapeamento geomorfológico no Brasil. In: I CONFERENCIA NACIONAL DE GEOGRAFIA E CARTOGRAFIA., 8., 1968, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: Universidade de São Paulo (USP), , 1968.p 1-9 .
- ALMEIDA, I. de C. **Estudo sobre o uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) para mapeamento aéreo com fins de elaboração de projetos viários.** 2014. 149p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2014.
- ALMEIDA FILHO, G. S. de. Processos Erosivos Urbanos. In: POLETO, C. (Org.). **Ambiente e Sedimentos.** 1. ed. Porto Alegre: ABRH, 2008. p. 404.
- ARAÚJO, L. E. de; SOUSA, F. de A. S. de; NETO, J. M. de M.; SOUTO, J. S.; REINALDO, L. R. L. R. Bacias Hidrográficas e Impactos Ambientais, **Qualitas Revista Eletrônica**, Campina Grande – PB. 18 p., 2009.
- AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; MELLO, C. R. De; FONSECA, S. Calibração e aplicação do modelo MUSLE em uma bacia hidrográfica nos Tabuleiros Costeiros brasileiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 6, p. 563–569, 2008.
- BARROS, C. A. P. de. **Comportamento hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica rural utilizando técnicas de monitoramento e modelagem.** 2012. Dissertação (Mestre em Ciência do Solo). Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.
- 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.
- BARTELS, G. K.; TERRA, V. S. S.; CASSALHO, F.; LIMA, L. S.; REINERT, D. J.; COLLARES, G. L. Spatial variability of soil physical and hydraulic properties in the southern Brazil small watershed. **African Journal of Agricultural**, v. 11, n. 49, p. 5036–5042, 2016.
- BELLINASSO, T. B.; PAIVA, J. B. D. de. Avaliação da produção de sedimentos em eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica semi urbana de encosta. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 4, p. 169–181, 2007.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo.** 7. ed. São Paulo: Ícone, 2010. 355p.
- BESKOW, S.; DE MELLO, C. R.; COELHO, G.; DA SILVA, A. M.; VIOLA, M. R. Estimativa do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica com base em modelagem dinâmica e distribuída. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 33, n. 1, p. 169–178, 2009a.
- BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; CURI, N.; VIOLA, M. R.; AVANZI, J. C. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. **Catena**, v. 79, n. 1, p. 49–59, 2009b.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. **Principles of soil conservation and management**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010. 626 p.

BOEING, E. L.; CATEN, A. ten; VITALIS, F. A. Aplicação de veículo aéreo não tripulado para o mapeamento. In: XXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA V CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO XXV EXPOSICARTA, 11., 2014. Gramado. **Anais...** Gramado:2014. p 1 - 11.

BOGAART, P. W.; TROCH, P. a. *Curvature distribution within hillslopes and catchments and its effect on the hydrological response*. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 3, n. 3, p. 1071–1104, 2006.

BORSELLI, L.; TORRI, D.; POESEN, J.; SANCHIS, P. S. Impact of rainwater quality on infiltration, runoff and interrill erosion processes. **Earth Surface Processes and Landforms**, p. 329–342, 2001.

BUENO, C. R. P.; ARRAES, C. L.; MIQUELONI, D. P. Aplicação do sistema de informação geográfica para determinação do fator topográfico em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 4, n. 2, p. 30–38, 2011.

CAMPANHARO, W. A.; HOLLANDA, M. De; CECÍLIO, R. D. A. Manejo de Bacias Hidrográficas e a Gestão Sustentável dos Recursos Naturais. **Manejo de Bacia Hidrograficas e a Gestão Sustentável dos Recursos Naturais**, p. 57–66, 2012.

CÂNDIDO, A. K. A. A.; ENCINA, C. C. C.; SCHLICHTING, A. F.; HAUPENTAL, M. R.; FILHO, A. C. P.; JÚNIOR, J. M.; SILVA, N. M. da. Modelo Digital de Superfície gerado a partir de imagens de VANT. **Anais 5o Simpósio de Geotecnologias no Pantanal**, v. 1, p. 296–303, 2014.

CAPOANE, V.; SANTOS, L. J. C.; SANTOS, D. R. do; TIECHER, T. Uso de atributos topográficos para predição de áreas propensas a perda e a deposição de sedimento em uma bacia hidrográfica do planalto do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 3, p. 469–483, 2015.

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

CECATTO, C. A. **Modelagem das perdas de solo e água por erosão hídrica pluvial**. 2014. Tese (Doutor em Manejo do Solo). Programa de Pós-Graduação em Manejo do Solo. Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2014.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher LTDA, 1980.

COELHO, L.; BRITO, J. N. **Fotogrametria digital**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: EDUERJ, 2007.

CUNHA, H. N. da. **Avaliação da suscetibilidade à erosão da bacia hidrográfica do alto camaquã - rs**. 2016. Dissertação (Mestre em Sensoriamento Remoto). Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

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. 28p

DANIEL, E. **Análise do papel da topografia e do uso do solo na distribuição dos processos erosivos da bacia do córrego espriado, São Pedro (SP)**. 2012. Dissertação (Mestre em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia Física. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

Desmet, P. J. J. & G. Govers. 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, 51 (5): 427-433.

EISENBEISS, H. A Mini Unmanned Aerial Vehicle (UAV): System Overview and Image Acquisition. **International Workshop on Processing and Visualization using High-Resolution Imagery**, p. 7 pages, 2004.

EISENBEISS, H. **Uav photogrammetry**. 2009. University of Technology Dresden, Germany, 2009.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuarias). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2ª ed. Rio de Janeiro - RJ: Embrapa Solos, 2006.

FARINASSO, M.; ABÍLIO, O.; JÚNIOR, D. C.; GUIMARÃES, R. F.; ARNALDO, R.; GOMES, T.; RAMOS, V. M. Avaliação Qualitativa Do Potencial De Erosão Laminar Em Grandes Áreas Por Meio Da Eups – Equação Universal de Perdas de Solos Utilizando Novas Metodologias em Sig Para Os Cálculos Dos Seus Fatores Na Região Do Alto Parnaíba – Pi-Ma. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 7, p. 73–85, 2006.

FERREIRA, A.; ROIG, H.; MAROTTA, G.; MENESES, P. Utilização de aeronaves remotamente pilotadas para extração de mosaico georreferenciado multiespectral e modelo digital de elevação de altíssima resolução espacial. In: XVI SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 2013. Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE. 2013. p. 9308–9315

FONTES, L. C. A. de A. Levantamentos aerofotogramétricos aplicados à topografia. In: **Fundamentos de aerofotogrametria**. Universidade Federal da Bahia – UFBA, 2008. p. 18.

GRENZDÖRFFER, G. J.; NIEMEYER, F. Uav Based Brdf-Measurements of Agricultural Surfaces With Pfiffikus. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXVIII-1/, n. September, p. 229–234, 2012.

HASENACK, H.; WEBER, E. (org.) Base cartográfica vetorial continua do Rio Grande do Sul – escala 1:50.000. Porto Alegre: UFRGS/Centro de Ecologia. 2010.1 DVD-ROM (Série Geoprocessamento, 3).

HIRSCHMULLER, H. Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 30, n. 2, p. 328–341, fev. 2008.

HOLDEN, J.; BURT, T. P. Infiltration, runoff and sediment production in blanket peat catchments: implications of field rainfall simulation experiments. **Hydrological Processes**, v. 16, n. 13, p. 2537–2557, set. 2002.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Manual técnico de geomorfologia**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2009. v. 2

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Mapeamento topográfico**. 2013. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias>. Acesso em: 05 Abr. 2015

ISPRS. **International Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, 2016. .

LAFLEN, J. M., Lane, L. J., and Foster, G. R.: WEPP – a next generation of erosion prediction technology, *J. SoilWater Conserv.*, 34–38, 1991.

LIMA, E. M. DE; THOMAZ, T. A. M.; SEVERO, T. C. **Mapeamento aerofotogramétrico digital utilizando fotografias de médio formato**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Cartográfica). Instituto de Geociencias.Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2010. 126 p.

LONGHITANO, G. A. **VANTs para sensoriamento remoto: aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas**. 2010. Dissertação (Mestre em Engenharia) Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. 148 p.

LOWE, D. G. Distinctive image features from scale invariant keypoints. *Int'l Journal of Computer Vision*, v. 60, p. 91–110, 2004.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. Tese (Doutor em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo. Piracicaba. 2002

MATA, C. L.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; CARVALHO, A. P. F.; GOMES, R. A. T.; MARTINS, É. de S.; GUIMARÃES, R. F. Avaliação Multitemporal da Susceptibilidade Erosiva na Bacia do Rio Urucuia (MG) por Meio da Equação Universal de Perda de Solos. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 8, n. 2, p. 57–71, 2007.

MEDEIROS, F. A. **Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para aplicação em agricultura de precisão**. 2007. Dissertação. (Mestre em Engenharia Agrícola). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

MELLO, C. R. de; SILVA, A. M. da. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras: UFLA, 2013.

MELLO, C. R. de. **Estudo hidrológico em micro-bacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero**. 2003. 133 p. Tese (Doutor em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2003.

MENESES, L. F. de; FIGUEIREDO, E. C. T. P. de; LEITE, E. P. F. Ortorretificação de fotografias aéreas de pequeno formato obtidas com câmara digital convencional. IN: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO. 8. , 2008. Recife. *Anais...* Recife: 2008 . p. 8–11.

MIKHAIL, E. M.; BETHEL, J. S.; MCGLONE, J. C. **Introduction to modern photogrammetry**. 6. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001

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**. 2007. Tese. (Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento

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.

MIRANDA, R.; ALMEIDA, R. De. A importância dos mapeamentos geomorfológicos na ciência geomorfológica. **Revista de Geografia**, v. 5, n. 2, 2015.

MCCOOL, D. K.; BROWN, L. C.; FOSTER, G. R. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 30, p. 1387-1396, 1987.

MCCOOL, D. K.; FOSTER, G. R.; MUTCHLER, C. K.; MEYER, L. D. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation, **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 32, p. 1571-1576, 1989

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

MORO, M. **A utilização da interface swat-sig no estudo da produção de sedimentos e do volume de escoamento superficial com simulação de cenários alternativos**. 2005. Dissertação (Mestre em Agronomia) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2005.

NASA. **Earth Observations and the Role of UAVs** (C. Yuhas, Ed.), 2006. .

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

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R. Soil and Water Assessment Tool User's Manual. **TWRI Report TR-192**, p. 412, 2000.

NONAMI, K.; KENDOUL, F.; SUZUKI, S.; WANG, W.; NAKAZAWA, D. **Autonomous flying robots**. Tokyo: Springer Japan, 2010. v. 1

OLIVEIRA, A. H. **Erosão hídrica e seus componentes na sub-bacia hidrográfica do horto florestal terra dura, Eldorado do Sul (RS)**. 2011. Tese (Doutora em Ciencia do Solo). Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2011.

OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; SOBRINHO, T. A.; PANACHUKI, E.; WENDLAND, E. Use of SRTM data to calculate the (R)USLE topographic factor. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 35, n. 3, p. 507–513, 21 jun. 2013.

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

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, n. 8, p. 819–825, 2010a.

OLIVEIRA, P. T. S. de; RODRIGUES, D. B. B.; ALVES SOBRINHO, T.; PANACHUKI, E. Estimativa do fator topográfico da USLE a partir de três algoritmos. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 5, n. 2, p. 217–225, 30 ago. 2010b..

PIMENTA, M. T. Directrizes para a Aplicação da Equação Universal de Perda dos Solos em SIG - Factor de Cultura C e Factor de Erodibilidade do Solo K. **INAG, Lisbon, Portugal.**, p. 12, 1998.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; MCCOOL, D. K.; YODER, D. C. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). Agriculture Handbook No. 703. **Agriculture Handbook**, p. 49, 1997

RIEKE, M.; FOERSTER, T.; GEIPEL, J.; PRINZ, T. High-Precision Positioning and Real-Time Data Processing of Uav-Systems. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXVIII-1/, n. September, p. 119–124, 2012.

ROLOFF, G. & DENARDIN, J. E. Estimativa simplificada da erodibilidade do solo. In: X Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água. **Anais...** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1994. p.146- 147.

ROIG, H. L.; FERREIRA, A. M. R.; MENEZES, P. H. B. J.; MAROTTA, G. S. Uso de câmeras de baixo custo acopladas a veículos aéreos leves no estudo do aporte de sedimentos no Lago Paranoá. In: XVI SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 2013. Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE. 2013. p. 9332–9339.

RUIZ, L. F. C. **Uma abordagem de classificação da cobertura da terra em imagens obtidas por veículo aéreo não tripulado**. 2001. Dissertação (Mestre em Sensoriamento Remoto). Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

SADEGHI, S. H. R.; MIZUYAMA, T. Applicability of the modified universal soil loss equation for prediction of sediment yield in khanmirza watershed, Iran. **Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques**, v. 52, n. 5, p. 1068–1075, 2007.

SANTOS, S. D. R.; HUINCA, S. C. M.; MELO, L. F. D. S.; SILVA, M. T. Q. S. DA; DELAZA, L. S. Considerações sobre a utilização do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) nos dias atuais. In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 4., 2010, Recife. **Anais...**, Recife: UFPE. 2010.p. 1–5.

SANTOS, rani dos; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. v. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. de C. **Hidrometria aplicada**. Curitiba: Instituto de tecnologia para desenvolvimento, 2001.

SEEGER, M.; ERREA, M. P.; BEGUERÍA, S.; ARNÁEZ, J.; MARTÍ, C.; GARCÍA-RUIZ, J. M. Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater

catchment in the Spanish pyrenees. **Journal of Hydrology**, v. 288, n. 3–4, p. 299–311, 2004.

SHREVE, E. A.; DOWNS, A. C. **Quality-assurance plan for the analysis of fluvial sediment by the u.s. geological survey kentucky water science center sediment laboratory**. Virginia: U.S. Geological Survey, 2005.

SILVA, D. C. DA; TOONSTRA, G. W. A.; SOUZA, H. L. S.; PEREIRA, T. Á. J. Qualidade de Ortomosaicos de Imagens de VANT Processados com os Softwares APS , Pix4D e Photoscan. IN: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, Recife. **Anais...** Recife: 2014.

SILVA, V. C. Da. Estimativa da erosão atual da bacia do Rio Paracatu (MG/GO/DF). **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 34, n. 3, p. 147–159, 2004.

SILVEIRA, J. F. da. **Aplicação e validação da musle utilizando dados hidrossedimentológicos locais de uma bacia hidrográfica do escudo sul-riograndense**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso.(Bacharel em Engenharia Hídrica). Centro de DEsenvolvimento Tecnológico. Universidade Federal de Pelotas, 2015.

SONTEK. **Flowtracker**. San Diego: SonTek/YSI incorporated, 2016.

SOUZA, A. A. de; JIMÉNEZ-RUEDA, J. R. Análise fisiográfica e morfoestrutural no reconhecimento de padrões de solos no município de Porto Velho-RO. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE. 2007.p. 6981–6985.

SOUZA, J. A. de; GOMES, I.; VIEIRA, E. M.; MACHADO, M. L.; SIMÃO, M. L. R. Obtenção do fator P (que considera as práticas conservacionistas adotadas) da equação universal de perda de solo (EUPS) na Bacia PN1/IGAM. IN: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, 1, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: EPAMIG, 2010.

TIWARI, A. K.; RISSE, L. M.; NEARING, M. a. Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 43, p. 1129–1135, 2000.

TOMAZONI, J. C.; GUIMARÃES, E. A sistematização dos fatores da EUPS em SIG para quantificação da erosão laminar na bacia do rio Jirau. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 3, p. 235–244, 2005.

TOMMASELLI, A. M. G. **Fotogrametria Básica**, 2009. .

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ ABRH, 2002.

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

VIEIRA, D. J. E.; NUNES, G. M.; FERNANDES, A. T. Utilização de ortomosaico com dados do infravermelho próximo adquirido por VANT no mapeamento de

fitofisionomias em área do Pantanal Norte de Mato Grosso. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 1, **Anais...**2015.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw- Hill, 1975.

VILLOTA, H. **Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de las tierras**. Bogotá: Instituto Geográfico "Augustin Codazzi", Subdirección de Docência e Investigación, 1991. 212 p

WORLD, V. **Manual de manejo de cuencas**. 2. ed. San Salvador: World Vision, 2004

WILLIAMS, J. R. Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. In: Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources. Oxford: USDA, 1975. p. 244-252

WILLIAMS, J. R.; BERNDT, H. D. Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology. **American Society of Agricultural Engineers**, v.20, p.1100-1104, 1977.

WISCHMEIER, W.H.; JOHNSON, C.B.; CROSS, B.V. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 26, n. 5, p. 189-193

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses. **Agriculture handbook**, n. 537, p. 285–291, 1978.

WMO, W. M. O. **Manual on sediment management and measurement** (Y. Xiaoqing, Ed.) Geneva, Switzerland World Meteorological Organization, , 2003. .

WOLF, P. R. **Elements of photogrammetry with photo interpretation and remote sensing**. New York: McGraw.Hill, 1983.

ZACHAR, D. **Soil erosion**. Czechoslovakia: Elsevier Scientific Publishig Company, 1982.

Apêndices

Anexo A – Tabela de coordenadas geográficas e altitude ortométrica dos pontos de controle

Ponto de Controle	Latitude	Longitude	Altitude Ortométrica
1	-31.616568	-52.568356	298.347
2	-31.616816	-52.570160	294.596
3	-31.622354	-52.572189	299.553
4	-31.611064	-52.571001	299.698
5	-31.612688	-52.573915	304.098
6	-31.615126	-52.567209	306.292
7	-31.612772	-52.567617	298.918
9	-31.615355	-52.577738	274.057
11	-31.612800	-52.574300	310.396
12	-31.616074	-52.572439	280.176
13	-31.621010	-52.580399	272.347
14	-31.612553	-52.580227	259.992
15	-31.613450	-52.585615	238.283
16	-31.620652	-52.573722	284.392
17	-31.617485	-52.573605	280.439
18	-31.619240	-52.571458	280.116
37	-31.617431	-52.586019	281.370
38	-31.619382	-52.585923	286.128
41	-31.619412	-52.583037	272.512
42	-31.619112	-52.583390	266.135
43	-31.622439	-52.580835	286.450
44	-31.621720	-52.580637	276.327
46	-31.621462	-52.580555	277.893
47	-31.619331	-52.579928	261.304
50	-31.614325	-52.589903	243.551
51	-31.622708	-52.572480	300.230
52	-31.621879	-52.570550	299.663
53	-31.620808	-52.569161	291.656
54	-31.616596	-52.567523	301.561
55	-31.619549	-52.571275	280.216
56	-31.622734	-52.574182	295.787
57	-31.622383	-52.578181	287.131
58	-31.617460	-52.578044	276.617
60	-31.618534	-52.579807	261.135
95	-31.610846	-52.575863	305.173
96	-31.613141	-52.571891	292.800
103	-31.611424	-52.586454	239.839
104	-31.612664	-52.580310	259.662
106	-31.612432	-52.583969	251.700
BASE	-31.6133263	-52.5855091	239.888

Anexo B – Tabelas de erro por desvio padrão dos pontos de controle

Ponto de Controle	X erro cm	Y erro cm	Z erro cm	Total erro cm	Imagem erro pixel
1	3.562	13.672	-30.790	33.877	1.017
2	-2.643	5.864	2.377	6.857	0.420
4	-6.032	9.416	-2.730	11.511	0.259
5	-7.475	-26.082	5.767	27.739	0.912
6	3.948	2.103	4.792	6.555	0.518
7	0.452	-3.349	-1.198	3.585	0.271
9	-0.484	0.282	-0.535	0.775	0.256
11	0.071	-0.020	0.081	0.110	0.025
12	-0.138	0.110	0.115	0.211	0.139
13	2.137	0.904	-3.996	4.621	0.851
14	7.696	8.139	32.559	34.432	1.319
15	-0.125	-0.519	1.827	1.904	0.191
16	-1.112	-0.827	-2.529	2.884	0.118
17	0.773	-0.688	1.313	1.672	0.312
18	0.821	8.276	-4.485	9.449	0.551
37	-1.586	2.784	2.407	4.008	0.368
38	2.554	0.955	-0.931	2.882	0.180
41	-2.091	-3.441	20.903	21.287	1.105
42	5.352	1.187	-20.342	21.068	0.669
43	0.502	8.174	12.159	14.660	0.546
44	10.612	-13.212	-24.454	29.752	2.267
46	-16.932	2.079	42.564	45.855	2.007
47	-6.510	1.494	-10.118	12.124	0.639
50	-0.100	-0.109	0.032	0.151	0.045
51	-3.955	0.636	0.997	4.128	0.132
52	10.339	6.244	-4.734	12.973	0.414
53	-10.144	-14.510	5.550	18.554	1.600
54	-2.895	-8.332	19.880	21.749	0.986
55	-2.964	-5.332	14.309	15.555	1.038
56	4.803	-0.883	2.438	5.458	0.143
57	-2.004	-0.913	-0.311	2.224	0.425
58	1.301	0.328	-2.930	3.222	0.158
60	3.310	-1.532	6.164	7.162	0.492
95	10.865	10.602	-3.629	15.609	0.861
96	0.146	3.603	-0.110	3.608	0.707
103	1.612	0.090	-0.759	1.784	0.142
104	-8.852	-9.162	-25.930	28.891	1.516
106	-2.878	0.345	0.231	2.908	0.927
Desvio padrão	5.614	7.304	13.757	11.674	0.546