

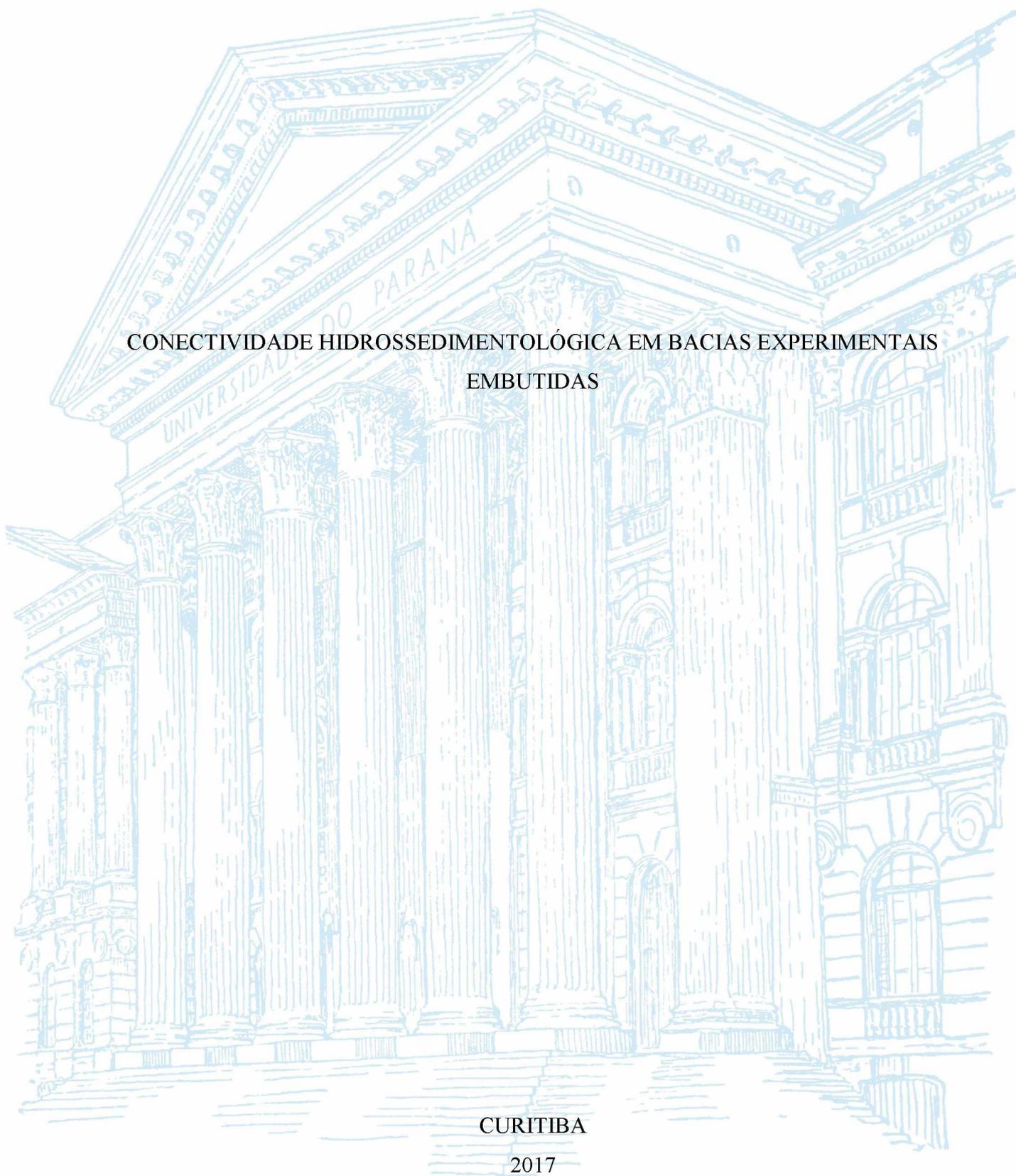
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GILSON BAUER SCHULTZ

CONECTIVIDADE HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM BACIAS EXPERIMENTAIS
EM BUTIDAS

CURITIBA

2017



GILSON BAUER SCHULTZ

CONNECTIVIDADE HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM BACIAS EXPERIMENTAIS
EMBUTIDAS

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Irani dos Santos

CURITIBA

2017

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

S387c

Schultz, Gilson Bauer

Conectividade hidrossedimentológica em bacias experimentais embutidas / Gilson Bauer Schultz. – Curitiba, 2017.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2017.

Orientador: Irani dos Santos .

1. Sedimentologia. 2. Sedimentos fluviais. 3. Transporte de sedimentos. 4. Bacia hidrográfica. 5. Solos - Erosão. I. Universidade Federal do Paraná. II. Santos, Irani dos. III. Título.

CDD: 551.354

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

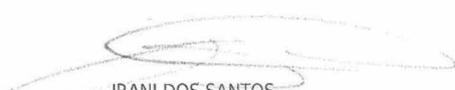


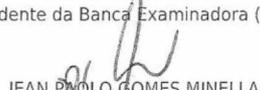
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor CIÊNCIAS DA TERRA
Programa de Pós Graduação em GEOGRAFIA
Código CAPES: 40001016035P1

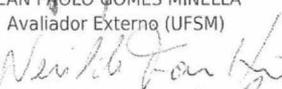
TERMO DE APROVAÇÃO

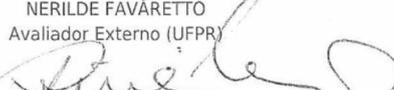
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOGRAFIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Tese de Doutorado de **GILSON BAUER SCHULTZ**, intitulada: "**CONECTIVIDADE HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM BACIAS EXPERIMENTAIS EMBUTIDAS.**", após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

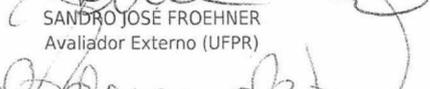
Curitiba, 26 de Outubro de 2017.


IRANI DOS SANTOS
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


JEAN PAULO GOMES MINELLA
Avaliador Externo (UFMS)


NERILDE FAVARETTO
Avaliador Externo (UFPR)


SANDRO JOSÉ FROEHNER
Avaliador Externo (UFPR)


EDUARDO ENEAS DE FIGUEIREDO
Avaliador Externo (UFCG)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor CIÊNCIAS DA TERRA
Programa de Pós Graduação em GEOGRAFIA
Código CAPES: 40001016035P1

ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE TESE PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM GEOGRAFIA

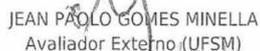
No dia vinte e seis de Outubro de dois mil e dezessete às 08:00 horas, na sala CT15, Edifício Setor Ciências da Terra, Centro Politécnico, Jardim das Américas, do Setor de CIÊNCIAS DA TERRA da Universidade Federal do Paraná, foram instalados os trabalhos de arguição do doutorando **GILSON BAUER SCHULTZ** para a Defesa Pública de sua Tese intitulada: "**CONNECTIVIDADE HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM BACIAS EXPERIMENTAIS EMBUTIDAS.**". A Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOGRAFIA da Universidade Federal do Paraná, foi constituída pelos seguintes Membros: IRANI DOS SANTOS (UFPR), EDUARDO ENÉAS DE FIGUEIREDO (UFCG), JEAN PAOLO GOMES MINELLA (UFMS), NERILDE FAVARETTO (UFPR), SANDRO JOSÉ FROEHNER (UFPR). Dando início à sessão, a presidência passou a palavra ao discente, para que o mesmo expusesse seu trabalho aos presentes. Em seguida, a presidência passou a palavra a cada um dos Examinadores, para suas respectivas arguições. O aluno respondeu a cada um dos arguidores. A presidência retomou a palavra para suas considerações finais. A Banca Examinadora, então, e, após a discussão de suas avaliações, decidiu-se pela APROVAÇÃO do aluno. O doutorando foi convidada a ingressar novamente na sala, bem como os demais assistentes, após o que a presidência fez a leitura do Parecer da Banca Examinadora. A aprovação no rito de defesa deverá ser homologada pelo Colegiado do programa, mediante o atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca dentro dos prazos regimentais do programa. A outorga do título de doutor está condicionada ao atendimento de todos os requisitos e prazos determinados no regimento do Programa de Pós-Graduação. Nada mais havendo a tratar a presidência deu por encerrada a sessão, da qual eu, IRANI DOS SANTOS, lavrei a presente ata, que vai assinada por mim e pelos membros da Comissão Examinadora.

Observações: O PROFS. JEAN MINELLA PARTICIPOU POR TELECONFERÊNCIA.

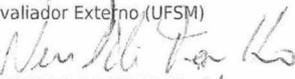
Curtiba, 26 de Outubro de 2017.


IRANI DOS SANTOS

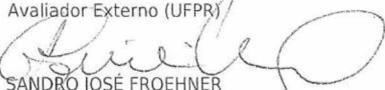
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


JEAN PAOLO GOMES MINELLA

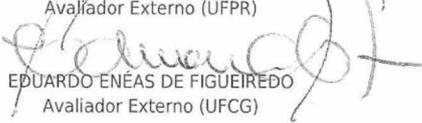
Avaliador Externo (UFMS)


NERILDE FAVARETTO

Avaliador Externo (UFPR)


SANDRO JOSÉ FROEHNER

Avaliador Externo (UFPR)


EDUARDO ENÉAS DE FIGUEIREDO

Avaliador Externo (UFCG)

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Irani dos Santos por ter me dado a oportunidade fazer parte da equipe do Laboratório de Hidrogeomorfologia (LHG/UFPR) e ter orientado esse trabalho.

À toda a equipe do Laboratório de Hidrogeomorfologia (LHG/UFPR).

Aos amigos e pesquisadores Cesar Augusto Crovador Siefert, Daniel Ribeiro Lange e Fernando Helmuth Syring Marangon, que estiveram presentes nas laboriosas atividades de campo e em longas conversas sobre a Hidrogeomorfologia.

À empresa Modo Battistella Reflorestamentos S/A (MOBASA) por ceder a área para a realização do estudo.

Ao Centro de Microscopia Eletrônica (CME/UFPR) pela disponibilização do microscópio eletrônico de varredura.

Ao Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR/UFPR) pela disponibilização do granulômetro a laser.

Ao Laboratório de Estudos Sedimentológicos (LABSED/UFPR) pela estrutura disponibilizada e ao seu técnico Daniel pelo auxílio no preparo das amostras de solos e sedimentos.

Ao Laboratório de Engenharia Ambiental Francisco Borsari Netto (LABEAM/UFPR) por disponibilizar sua estrutura e à sua técnica Luciane Prado pelo auxílio na realização das análises de carbono orgânico.

Aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFPR, Adriana Cristina Oliveira, Alexandra Aparecida Gama e Luiz Carlos Zem.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão bolsa de estudos.

À Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) que, pela chamada pública CT HIDRO 01/2010, financiou o projeto “Rede de Pesquisa em monitoramento e modelagem de processos hidrossedimentológicos em bacias representativas rurais e urbanas do bioma Mata Atlântica (RHIMA)” possibilitando a compra de equipamentos e realização de atividades de campo.

RESUMO

A produção de sedimentos em bacias hidrográficas é dependente dos processos erosivos e da transferência dos sedimentos ao longo das vertentes e da rede de drenagem realizada pelo escoamento. Essa capacidade de transferência, variável no espaço e no tempo, é definida com conectividade hidrossedimentológica. Esse estudo tem como objetivo avaliar a dinâmica da erosão e do transporte de sedimentos nas vertentes e na rede de drenagem e identificar a conectividade hidrossedimentológica em bacias experimentais embutidas com cobertura florestal por meio de monitoramento e modelagem. O trabalho foi realizado na bacia experimental do rio Saci localizadas no município de Rio Negrinho, SC. O uso da terra na área de estudo é composto por plantio de *Pinus taeda*, floresta nativa em zona ripária e estradas não pavimentadas. O monitoramento foi realizado em cinco estações, com áreas de drenagem variando entre 0,4 a 18,5 ha, sendo três nascentes, V1, V2 e V3, em que as duas primeiras estão contidas na área de drenagem estação Saci, que drena juntamente com a estação V3, até o exutório (V5). Foram coletadas amostras dos solos nos diferentes usos da terra, além de material de fundo e sedimentos transportados em cada uma das estações de monitoramento, para as quais foi analisada a composição química elementar, para estabelecer a relação entre fontes e sedimentos transportados. Nas cinco bacias foi realizado monitoramento de vazão e nas estações Saci e V5 foi realizado o monitoramento de concentração de sedimentos. Nas séries monitoradas 26 eventos de precipitação foram identificados e posteriormente caracterizados pela geração de escoamento superficial, transporte de sedimentos e histerese entre vazão e concentração de sedimentos. O modelo LISEM foi utilizado para validar a conectividade hidrossedimentológica na escala de bacia identificada na análise de eventos. As análises dos sedimentos indicaram que nas quatro bacias de menor área os sedimentos transportados são provenientes do material de fundo dos canais de drenagem e da zona ripária, não havendo contribuição de sedimentos das estradas presentes na área. As fontes de escoamento e sedimentos resultantes da análise dos eventos na estação Saci confirmam essa distribuição espacial. Para a estação V5 a análise das características dos sedimentos indicou que ocorre a conectividade de sedimentos das estradas. Para essa estação foi verificado que a conexão hidrossedimentológica das estradas não ocorre em todos os eventos, no entanto, os sedimentos transportados, mesmo em eventos em que não há conexão, são provenientes de depósitos de material produzido nas estradas e transportados até o canal durante eventos em que houve a conectividade. Na simulação com o modelo LISEM foi reproduzida adequadamente a dinâmica espacial e temporal do escoamento e transporte de sedimentos observada nos eventos validando as conclusões das análises. Por existir na bacia hidrográfica áreas em que é observada a geração de escoamento e processos erosivos sem que se produza resposta no exutório, a identificação da conectividade é determinante para o entendimento do comportamento hidrossedimentológico.

Palavras-chave: Conectividade hidrossedimentológica. Transporte de sedimentos. Bacia hidrográfica florestada. Modelo LISEM.

ABSTRACT

The sediment production on watersheds is dependent on both erosion processes and sediment transfer along the hillslopes and the drainage network. This sediment transfer capacity, variable in space and time, is defined as connectivity. The main objective of this study is to evaluate the erosion and sediment transport dynamics in the hillslopes and drainage network and to identify the hydrosedimentological connectivity in nested experimental watersheds with forest cover by monitoring and modeling. The study was carried out in the Saci river experimental watershed located in the municipality of Rio Negrinho, Santa Catarina, Brazil. The land cover in the area is composed of *Pinus taeda*, native forest in riparian zone and unpaved roads. The monitoring was conducted at five stations with catchment areas ranging from 0.4 to 18.5 ha. Three stations are located in springs, called V1, V2 and V3, in which the first two are in the catchment area of the Saci river station, which drains along with the V3, to the outlet (V5). Samples were collected from soils on the different land covers, channel bed material and sediments transported at each of the monitoring stations. Elemental chemical composition of the samples was analyzed in order to establish the relationship between sources and transported sediments. Stream flow was monitored in the five stations and sediment concentration was monitored in Saci and V5 stations. In the monitored series 26 precipitation events were identified and characterized by total surface runoff, sediment transport and hysteresis between stream flow and sediment concentration. The LISEM model was applied to validate the hydrosedimentological connectivity in the watershed scale. The sediment analysis indicated that on the four smaller watersheds the sediment sources are the channel bed and riparian zone with no connectivity of unpaved roads. The spatial sources of overland flow and sediments determined by the events analysis confirm this connectivity pattern. The analysis of sediment characteristics for station V5 indicated that the sediment connectivity of the unpaved roads occurred. For this watershed it was verified that the hydrosedimentological connection of the unpaved roads does not occur in all the events. However, even in events in which there was no hydrosedimentological connectivity of unpaved roads the sediments transported were mobilized from deposits of sediments produced on unpaved roads and transported to the channel during events in which there was connectivity. In the simulation with the LISEM model the spatial and temporal dynamics of overland flow and sediment transport, observed in the events, were correctly reproduced validating the conclusions of the analyzes. Due to the presence of areas in the watershed on which overland flow and erosion processes are observed without causing a response in the outlet, the identification of the connectivity is determinant for the understanding of hydrosedimentological behavior.

Keywords: Hydrosedimentological connectivity. Sediment transport. Forested watershed. LISEM model.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – NÍVEIS DE CONECTIVIDADE COM BASE NO CONTATO FÍSICO E TRANSFERÊNCIA DE MATERIAL.....	19
FIGURA 2 – POSSÍVEIS EFEITO DAS ESTRADAS NA CONECTIVIDADE.....	20
FIGURA 3 – CONECTIVIDADE DE SEDIMENTOS VARIANDO NO TEMPO EM FUNÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE SEDIMENTOS E MAGNITUDE DE EVENTOS	21
FIGURA 4 – VELOCIDADE DE ESCOAMENTO PARA OCORRÊNCIA DE EROSÃO, TRANSPORTE E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS EM FUNÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS	23
FIGURA 5 – TIPOS DE LAÇOS DE HISTERESE OBSERVADOS NA RELAÇÃO VAZÃO CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS.....	25
FIGURA 6 – FLUXOGRAMA DE SIMULAÇÃO DO MODELO LISEM.....	33
FIGURA 7 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	36
FIGURA 8 – PERFIL LONGITUDINAL COM REPRESENTAÇÃO DA PROFUNDIDADE DA CAMADA DE SOLO, FOLHELHO E ARENITO NO TALVEGUE DA ÁREA DE ESTUDO.....	37
FIGURA 9 – USO E COBERTURA DO SOLO DA ÁREA DE ESTUDO.....	38
FIGURA 10 – USO E COBERTURA DA TERRA NA ÁREA DE ESTUDO	39
FIGURA 11 – PLUVIÔMETRO UTILIZADO PARA O REGISTRO AUTOMÁTICO DA PRECIPITAÇÃO	40
FIGURA 12 – ESTRUTURAS UTILIZADAS PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO.....	41
FIGURA 13 – INSTALAÇÃO DE VERTEDOR.....	42
FIGURA 14 – AMOSTRADOR DO TIPO INTEGRADOR NO TEMPO	43
FIGURA 15 – AMOSTRADOR TIPO INTEGRADOR NO TEMPO INSTALADO NA ESTAÇÃO SACI.....	43
FIGURA 16 – LEITURAS DE TURBIDEZ EM LABORATÓRIO PARA DEFINIÇÃO DE CURVA TURBIDEZ X CSS.....	44
FIGURA 17 – CURVA TURBIDEZ X CSS DEFINIDA PARA A ESTAÇÃO SACI	44
FIGURA 18 – CURVA TURBIDEZ X CSS DEFINIDA PARA A ESTAÇÃO V5.....	45
FIGURA 19 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE COLETA DE AMOSTRAS DE SOLOS E SEDIMENTOS.....	46

FIGURA 20 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL UTILIZADA PARA ATRIBUIR OS PARÂMETROS DO MODELO LISEM.....	55
FIGURA 21 – CURVA DE PERMANÊNCIA DA VAZÃO NAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO.....	59
FIGURA 22 – CURVA DE PERMANÊNCIA DA DESCARGA SÓLIDA NAS ESTAÇÕES SACI E V5.....	59
FIGURA 23 – DIÂMETRO MEDIANO DAS PARTÍCULAS (D50) DE SOLOS E SEDIMENTOS NA BACIA DO RIO SACI.....	62
FIGURA 24 – GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS DE FUNDO NOS PONTOS DE MONITORAMENTO.....	62
FIGURA 25 – TEOR DE CARBONO EM SOLOS E SEDIMENTOS.....	64
FIGURA 26 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO CARBONO ORGÂNICO TOTAL NAS AMOSTRAS.....	65
FIGURA 27 – TEOR DE CARBONO NO MATERIAL DE FUNDO E EM SEDIMENTOS TRANSPORTADOS.....	66
FIGURA 28 – COMPONENTES PRINCIPAIS E GRUPOS DEFINIDOS PARA FONTES DE SEDIMENTOS.....	69
FIGURA 29 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS AMOSTRAS DE ACORDO COM A ANÁLISE DE AGRUPAMENTO.....	71
FIGURA 30 – COMPONENTES PRINCIPAIS E GRUPOS DEFINIDOS PARA FONTES E SEDIMENTOS TRANSPORTADOS.....	72
FIGURA 31 – RELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E ESCOAMENTO SUPERFICIAL PARA AS BACIAS.....	78
FIGURA 32 – ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO DO ESCOAMENTO DUNIANO.....	79
FIGURA 33 – RELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA BACIA DO RIO SACI.....	80
FIGURA 34 – RELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA BACIA V5.....	81
FIGURA 35 – RELAÇÃO ENTRE ESCOAMENTO SUPERFICIAL NAS BACIAS SACI E V5 PARA ESCOAMENTO PROVENIENTE DA ZONA RIPÁRIA E COM CONTRIBUIÇÃO DE ESTRADAS.....	82
FIGURA 36 – CONECTIVIDADE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL.....	83
FIGURA 37 – ÁREAS DE TRANSFERÊNCIA DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL DE ESTRADAS PARA ENCOSTAS.....	84

FIGURA 38 – EXEMPLO DE EVENTO OBSERVADO NA BACIA SACI (EVENTO 2)..	87
FIGURA 39 – RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO PARA OS EVENTOS OBSERVADOS NA BACIA SACI.....	88
FIGURA 40 – RELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE DA PRECIPITAÇÃO (I_{10}) E CONCENTRAÇÃO MÁXIMA DE SEDIMENTOS DOS EVENTOS OBSERVADOS NA ESTAÇÃO SACI.....	88
FIGURA 41 – SÉRIE DE VAZÃO E CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS DA BACIA SACI EM SEQUÊNCIA DE EVENTOS EVIDENCIANDO REDUÇÃO DO SUPRIMENTO DE SEDIMENTOS	89
FIGURA 42 – EXEMPLO DE RELAÇÃO VAZÃO X CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS IDENTIFICADOS NA BACIA V5.....	91
FIGURA 43 – RELAÇÃO ENTRE ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL (A_C) E TEMPO DE PICO DE CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO (CSS) NA BACIA V5	92
FIGURA 44 – RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO.....	93
FIGURA 45 – TRANSPORTE E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS CONDICIONADOS PELA CONECTIVIDADE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL	95
FIGURA 46 – ESCOAMENTO SUPERFICIAL OBSERVADO E SIMULADO.....	98
FIGURA 47 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL SIMULADO	99
FIGURA 48 –TRANSPORTE DE SEDIMENTOS OBSERVADO E SIULADO	101
FIGURA 49 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL EROÇÃO E DEPOSIÇÃO SIMULADAS....	102

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – TAXAS DE EROÇÃO EM DIFERENTES USOS DA TERRA.....	22
TABELA 2 – TRANSPORTE DE CARBONO ORGÂNICO EM SUSPENSÃO EM PEQUENAS BACIAS.....	29
TABELA 3 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO MODELO LISEM.....	32
TABELA 4 – RESUMO DE INFORMAÇÕES SOBRE ÁREAS MONITORADAS.....	38
TABELA 5 – SEDIMENTOS ACUMULADOS NOS AMOSTRADORES EM CADA PERÍODO.....	46
TABELA 6 – PARÂMETROS DE INFILTRAÇÃO E EROÇÃO ASSOCIADOS ÀS CLASSES DE SOLOS.....	56
TABELA 7 – PARÂMETROS ASSOCIADOS À DISTRIBUIÇÃO DO USO DA TERRA.....	57
TABELA 8 – ESCOAMENTO E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS.....	60
TABELA 9 – TEORES DE CARBONO ORGÂNICO NAS AMOSTRAS DE SOLOS E MATERIAL DE FUNDO.....	63
TABELA 10 –TEORES DE CARBONO ORGÂNICO EM SEDIMENTOS TRANSPORTADOS.....	66
TABELA 11 – RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA ELEMENTAR MEV/EDS.....	68
TABELA 12 - CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO E ESCOAMENTO NOS EVENTOS NA BACIA V5.....	74
TABELA 13 - CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO E ESCOAMENTO NOS EVENTOS NA BACIA SACI.....	74
TABELA 14 – CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO E ESCOAMENTO NOS EVENTOS NA BACIA V1.....	75
TABELA 15 – CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO E ESCOAMENTO NOS EVENTOS NA BACIA V2.....	76
TABELA 16 - CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO E ESCOAMENTO NOS EVENTOS NA BACIA V3.....	77
TABELA 17 - CARACTERÍSTICAS DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NOS EVENTOS DAS BACIAS V5 E SACI.....	86
TABELA 18 - RESUMO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE ESCOAMENTO POR BACIA.....	98
TABELA 19 - RESUMO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR BACIA.....	100

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
2.	OBJETIVOS	17
2.1.	OBJETIVO GERAL.....	17
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1.	CONECTIVIDADE E SUA RELAÇÃO COM O TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	18
3.2.	PROCESSOS DE EROÇÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	22
3.2.1.	Histerese entre vazão e concentração de sedimentos	24
3.3.	DEFINIÇÃO DE FONTES DE SEDIMENTO E CONECTIVIDADE COM CANAIS DE DRENAGEM POR MEIO DE CARACTERÍSTICAS DOS SEDIMENTOS.....	27
3.4.	Modelagem distribuída de erosão e transporte de sedimentos na escala de bacia	31
4.	MATERIAL E MÉTODOS	35
4.1.	ÁREA DE ESTUDO	35
4.2.	MONITORAMENTO DE ESCOAMENTO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	39
4.3.	ANÁLISE QUÍMICA ELEMENTAR E GRANULOMÉTRICA DE ÁREAS FONTE E DE SEDIMENTOS TRANSPORTADOS.....	45
4.3.1.	Análise estatística	47
4.4.	ANÁLISE DE EVENTOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS	48
4.5.	APLICAÇÃO DO MODELO LISEM	50
4.5.1.	Dados de entrada do modelo LISEM	53
4.5.2.	Calibração do modelo LISEM.....	57
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1.	COMPORTAMENTO HIDROSEDIMENTOLÓGICO NO PERÍODO DE MONITORAMENTO	58
4.1.1.	Características gerais de vazão e transporte de sedimentos	58
4.1.2.	Caracterização dos sedimentos.....	61
4.1.3.	Teor de carbono orgânico em sedimentos	63
4.1.4.	Relação entre fontes e sedimentos transportados	67
4.2.	CONECTIVIDADE HIDROSEDIMENTOLÓGICA	73

4.2.1.	Análise da conectividade hidrossedimentológica em eventos	73
4.2.1.1.	Conectividade do escoamento superficial	73
4.2.1.2.	Conectividade do transporte de sedimentos	85
4.2.2.	Simulação hidrossedimentológica com o modelo LISEM	96
5.	CONCLUSÕES	105
6.	RECOMENDAÇÕES	107
	REFERÊNCIAS	108

1. INTRODUÇÃO

A produção de sedimentos em bacias hidrográficas é dependente de diversos fatores que controlam a disponibilização de material pelos processos erosivos e seu transporte ao longo das vertentes e pela rede de drenagem até chegar ao exutório. Esse transporte é condicionado pelas características morfológicas das vertentes e pela capacidade que o escoamento tem de mover esses sedimentos entre as porções da paisagem que compõe seu caminho. Essa capacidade de transferência de sedimentos entre porções da bacia hidrográfica é chamada de conectividade (BRACKEN; CROKE, 2007).

A conectividade é identificada quanto ao seu caráter estrutural (*structural connectivity*) e dinâmico (*functional connectivity*) (LEXARTZA-ARTZA; WAINWRIGHT, 2009). A componente estrutural é composta pelas características que definem o padrão espacial de recorrência da conectividade. O caráter dinâmico é definido pela variação temporal da ocorrência da conectividade do escoamento e sedimentos, condicionados pelo componente estrutural, e dependente das características de eventos e condições antecedentes. Nesse sentido, a conectividade entre encostas e canal fluvial é dependente de uma combinação de fatores, que não é constante ao longo do tempo.

As pequenas bacias, sobretudo de primeira e segunda ordem, compõem aproximadamente 70% da superfície das bacias hidrográficas, e nelas ocorre a maior parte dos processos que condicionam a transferência do material erodido para ambientes fluviais (GOMI et al., 2002). O estudo dos processos hidrossedimentológicos em pequenas bacias é fundamental para compreender a relação entre vertentes e canais de drenagem tendo em vista que essa relação é menos identificável com o aumento da área de drenagem e predomínio dos processos fluviais (HOPE et al., 2004). Além disso, são nessas pequenas bacias que são desenvolvidas as atividades de produção agrícola e florestal, estando sujeitas ao efeito de mudanças de uso da terra e intervenções que modificam a drenagem superficial, como a construção de estradas. Esses fatores tornam o estudo de bacias hidrográficas nessa escala relevante para a conservação dos solos e dos recursos hídricos.

As bacias florestadas têm como características a cobertura do solo por vegetação arbórea e, em áreas de exploração madeireira, são presentes as estradas não pavimentadas. Nessas áreas existem condições contrastantes de uso da terra, além de características geomorfológicas e hidrológicas que influenciam a distribuição espacial dos processos de geração de escoamento e

erosão. Enquanto nas áreas florestadas a erosão é menos intensa, observando-se maiores taxas de infiltração e geração de escoamento superficial por saturação (SANTOS, 2009), nas estradas tem-se menores taxas de infiltração, predominando a geração de escoamento hortoniano e condições que facilitam a ocorrência de processos erosivos (LUCE, 2002; SIDLE et al., 2004). Assim, a geração de escoamento superficial ocorre de forma concentrada em porções das bacias florestadas, que condiciona a contribuição de sedimentos. No entanto, apesar de as estradas serem reconhecidas como importantes fontes de sedimentos e escoamento (ZIEGLER; GIAMBELLUCA, 1997; MINELLA et al., 2007; THOMAZ et al., 2011), a ocorrência local dos processos não é necessariamente percebida como resposta no exutório da bacia estando condicionada a conectividade (AMBROISE, 2004). A compreensão sobre as condições de conectividade, fatores que controlam sua ocorrência e seu efeito na resposta hidrossedimentológica necessitam de mais estudos para entender seu funcionamento e como responde a mudanças na bacia hidrográfica (LEXARTZA-ARTZA; WAINWRIGHT, 2009).

A conectividade é avaliada muitas vezes pela utilização de experimentos baseados em monitoramento e modelagem em bacias embutidas (WAINWRIGHT et al., 2011). Esse tipo de estudo consiste na definição de sub-bacias contidas em uma bacia maior. Dessa forma é possível verificar a ocorrência dos processos em escalas intermediárias e determinar a ocorrência de conectividade entre as sub-bacias, e dessas até o exutório da bacia principal. Devido à influência de múltiplos fatores, estruturais e dinâmicos, que controlam a conectividade hidrossedimentológicas, a integração de diferentes técnicas de avaliação de erosão e produção de sedimentos permite identificar as fontes de transporte de sedimentos ao longo das bacias de forma mais efetiva (FRYIRS, 2013).

A utilização de modelos de simulação de processos associada a observações de campo permite o teste de hipóteses em situações nas quais o sistema modelado apresente estrutura compatível aos processos simulados. Nesse sentido, os modelos permitem extrapolar as medições e avaliar o comportamento de determinadas variáveis em escalas de espaço e tempo mais amplas do que as utilizadas no monitoramento (BEVEN, 2001). Essa característica é evidenciada na utilização principalmente dos modelos distribuídos que permitem, além da simulação dos processos resultando em uma resposta para a bacia como um todo, a avaliação de sua distribuição espacial simuladas (MERRITT et al., 2001). Apesar do desenvolvimento constante de modelos que permitem simular os processos de geração de escoamento, transporte de sedimentos e a transferência destes ao longo das bacias hidrográficas, o monitoramento e análise quantitativa de dados, e a aquisição de informações de campo, como a coleta de

amostras para a definição de fontes por características físicas e químicas dos sedimentos (COLLINS; WALLING, 2004), são imprescindíveis dentro de uma perspectiva de compreensão dos processos (SIDLE, 2006; SILBERSTEIN, 2006) e sua correta representação (TAKKEN et al., 2005).

Nessa perspectiva, esse trabalho utiliza monitoramento intensivo, modelagem matemática distribuída e análises de propriedades químicas de solos e sedimentos em cinco bacias experimentais embutidas visando responder o seguinte problema de pesquisa: Como ocorre a conectividade hidrossedimentológica em bacias hidrográficas florestadas? Para isso, tem-se como hipótese que a conectividade hidrossedimentológica é bem definida espacialmente, por padrões associados às áreas de geração de escoamento, e é variável no tempo em função da magnitude dos eventos de precipitação.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a dinâmica da erosão e do transporte de sedimentos nas vertentes e na rede de drenagem e identificar a conectividade hidrossedimentológica em bacias experimentais embutidas com cobertura florestal por meio de monitoramento e modelagem.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir a estrutura espacial da conectividade por meio da análise de características dos sedimentos, estabelecendo a relação entre os sedimentos das vertentes, material de fundo e sedimentos transportados em bacias embutidas;

- Identificar o efeito da magnitude dos eventos de precipitação na dinâmica da conectividade entre as áreas de geração de escoamento e fontes de sedimentos ao longo das bacias embutidas;

- Validar a conectividade hidrossedimentológica na escala de bacia utilizando modelo distribuído de simulação de eventos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. CONECTIVIDADE E SUA RELAÇÃO COM O TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

De acordo com Pringle (2003) a conectividade hidrológica é definida como a transferência de matéria, energia ou organismos dentro ou entre elementos do ciclo hidrológico. Nos estudos de hidrologia e geomorfologia Bracken e Croke (2007) identificaram três formas de utilização do conceito de conectividade, sendo: conectividade da paisagem, que se refere ao contato físico entre duas formas do relevo, como vertentes e canal fluvial; conectividade hidrológica, que se refere à passagem da água de uma porção para outra da paisagem e da qual se espera que provoque efeito notável na resposta hidrológica em bacias hidrográficas; conectividade sedimentológica, que é a transferência de sedimentos dentro de bacias hidrográficas. Nesse contexto, a conectividade hidrossedimentológica é definida como transferência de sedimentos entre porções da bacia hidrográfica por meio da ação do escoamento e, portanto, dependente da conectividade hidrológica.

Por haver um padrão espacial na resposta de geração de escoamento, superficial, sub-superficial e subterrâneo, resultante da ação de fatores climáticos, Bracken e Croke (2007) consideram ser possível delimitar em bacias hidrográficas “unidades de resposta hidrológica”, admitindo-se que a geração do escoamento tem uma distribuição espacial que é definida pela combinação dos atributos da paisagem, tais como, geologia, solos, topografia e vegetação.

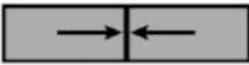
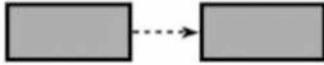
No entanto, essas porções da bacia hidrográfica nem sempre apresentam evidente conexão pelos processos hidrológicos. Hairsine et al. (2002) observaram que o escoamento produzido em área com baixas taxas de infiltração, tais como em estradas, quando conduzido para as encostas, com maior capacidade de infiltração, tende a infiltrar e atingir uma distância limitada não havendo necessariamente conectividade hidrológica ao longo do caminho do escoamento definido pela convergência topográfica. A distância alcançada pelo escoamento depende da precipitação, do volume de escoamento gerado e das características da vertente como a declividade e capacidade de infiltração.

A conexão entre as diferentes partes de uma bacia está, portanto, condicionada a uma complexa estrutura espacial e sua dinâmica é governada por limiares entre processos (MEERVELD; MCDONNELL, 2006). O conhecimento dos padrões espaciais e da dinâmica

temporal que propiciam ocorrência desses processos são determinantes no conceito de conectividade (CAMMERAAT, 2002; PRINGLE, 2003; SOULSBY et al., 2006).

A abordagem da conectividade pode então, ser identificada quanto ao seu caráter estrutural (*structural connectivity*) e dinâmico (*functional connectivity*) (LEXARTZA-ARTZA; WAINWRIGHT, 2009). A conectividade estrutural é a abordagem estática da relação entre diferentes porções da paisagem, como a apresentada por Bracken e Croke (2007), consistindo na classificação da conectividade pela caracterização das fontes e formas do relevo sem considerar o efeito de diferentes processos e a variação temporal dos fatores que desencadeiam a conexão entre essas porções. A conectividade dinâmica, por outro lado, é aquela que tem como princípio identificar a conectividade de porções da paisagem, de acordo com os processos atuantes e a interação entre eles, que tem influência da conectividade estrutural, mas que são dependentes da ocorrência de eventos, e que assim, tem variação no tempo, como nas abordagens de Hairsine et al. (2002) e Meerveld e McDonnell (2006).

FIGURA 1 – NÍVEIS DE CONECTIVIDADE COM BASE NO CONTATO FÍSICO E TRANSFERÊNCIA DE MATERIAL

Nº	Contato físico	Transferência de material	Representação gráfica	Tipo de conectividade
1	Sim	Sim		Sistema com conexão ativa
2	Sim	Não		Sistema com conexão inativa
3	Não	Sim / em eventos pouco frequentes		Sistema parcialmente conectado
4	Não	Não		Sistema desconectado

FONTE: Modificado de Jain e Tandon (2010)

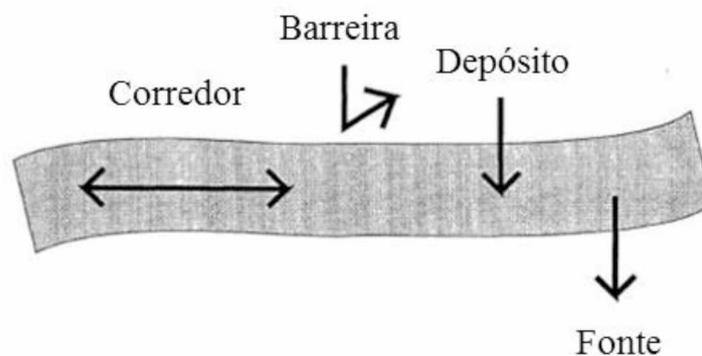
Neste sentido, Jain e Tandon (2010) propuseram uma classificação de conectividade em quatro níveis com base no contato físico e transferência de material (FIGURA 1). Os dois primeiros níveis são caracterizados pelo contato físico entre as unidades consideradas, sendo que no nível 1 denominado sistema com conexão ativa, tais como na interação canal e planície de inundação, e no nível 2 apesar de haver contiguidade espacial não ocorre interações sendo

então um sistema com conexão inativa. Os níveis 3 e 4 são fisicamente desconectados, porém no nível 3 ocorre transferência de matéria em eventos de ocorrência menos frequentes sendo chamados de sistemas parcialmente conectados.

A presença nas bacias hidrográficas das diferentes formas de conectividade classificadas por Tandon (2010) tem como consequência o fato de diferentes partes da área de drenagem apresentar conectividade, pela transferência de escoamento e sedimentos, com frequência e intensidade distintas, com algumas porções apresentando conectividade apenas em raros eventos extremos. Nesse contexto, Fryirs et al. (2007) enfatizam a importância da desconectividade nos estudos da dinâmica de sedimentos e a definem como o grau com que um fator limitante afeta a eficiência da transferência de sedimentos. A desconectividade tem como consequência limitar a área de contribuição do exutório, pois porções da bacia em que ocorre geração de escoamento e sedimentos podem não ter influência verificada no exutório. Dessa forma, se diferenciam as áreas ativas, com processo ocorrendo no local, das áreas de contribuição efetiva dentro da bacia hidrográfica (AMBROISE, 2004; FRYIRS et al., 2013)

Essa abordagem pode ser empregada na classificação de unidades destacando, como exemplo, a presença de estradas não pavimentadas. As estradas podem apresentar características de conectividade/desconectividade. De acordo com Jones et al. (2000), quando inseridas na paisagem as estradas podem assumir função de corredor, barreira, depósito e fonte (FIGURA 2).

FIGURA 2 – POSSÍVEIS EFEITO DAS ESTRADAS NA CONECTIVIDADE

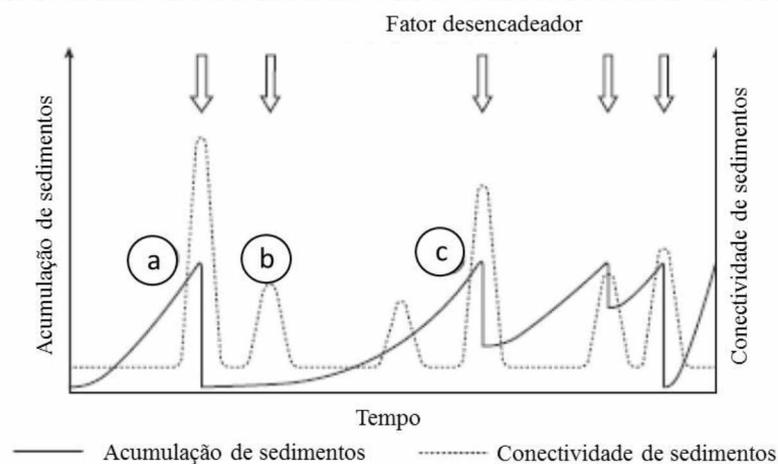


FONTE: Modificado de Jones et al. (2009)

A ocorrência da conectividade de sedimentos pode ser condicionada tanto pela passagem do escoamento de uma porção da bacia para outra como pela disponibilidade de

sedimentos para que o processo ocorra. A FIGURA 3, exemplifica três momentos de ocorrência da conectividade condicionada pela acumulação de sedimentos e desencadeada pela ação dos processos hidrológicos.

FIGURA 3 – CONECTIVIDADE DE SEDIMENTOS VARIANDO NO TEMPO EM FUNÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE SEDIMENTOS E MAGNITUDE DE EVENTOS



FONTE: Modificado de Bracken e Croke (2007)

No caso “a”, o alto grau de conectividade ocorre quando mobilizado pelo agente de transporte devido à grande acumulação de sedimentos disponíveis para o ser transportado. No caso “b”, o mesmo agente de transporte não é capaz de proporcionar conectividade do mesmo grau por não haver sedimentos disponíveis. Na condição “c”, a acumulação é retomada em nível similar ao caso “a” resultando em conectividade similar. Dessa forma pode-se entender a conectividade como sendo dinâmica e dependente dos processos hidrológicos.

A identificação da conectividade em seu caráter dinâmico pode ser realizada por meio da utilização de experimentos em bacias embutidas (WAINWRIGHT et al., 2011). Consiste no monitoramento da área principal, que engloba áreas menores, nas quais são monitorados os mesmos processos. Dessa forma é possível verificar a ocorrência dos processos em escalas intermediárias e determinar a ocorrência de conectividade entre as sub-bacias, e dessas até o exutório da bacia principal.

3.2. PROCESSOS DE EROSÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

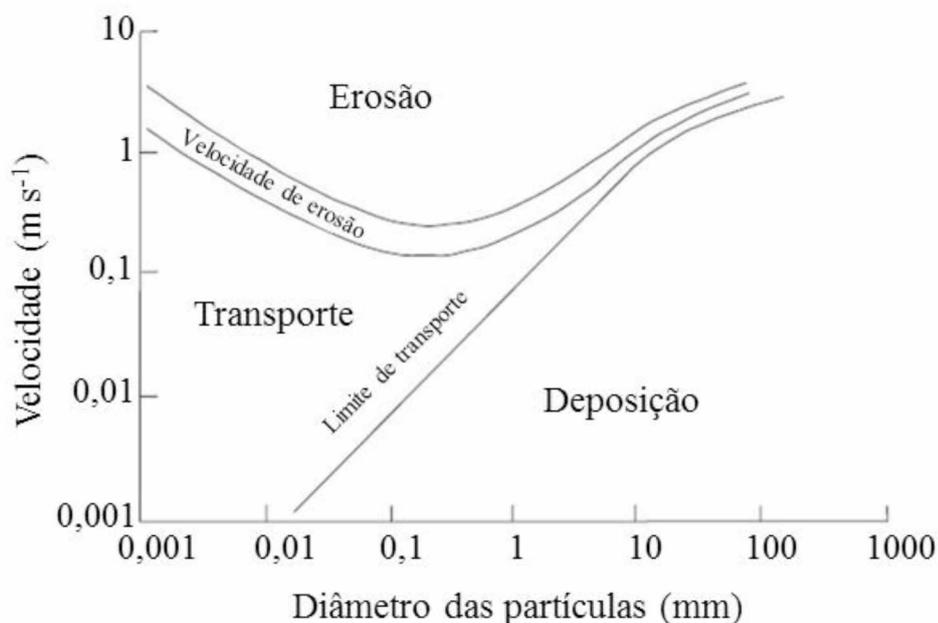
A produção de sedimentos é definida como a descarga sólida total transportada pelo escoamento até um ponto de controle em um determinado período de tempo (VANONI, 1975). Essa produção de sedimentos é dependente de processos de erosão, que disponibilizam os sedimentos, e da capacidade de transporte do escoamento (JULIEN, 1995). Assim, os sedimentos disponibilizados em determinadas porções de uma bacia hidrográfica, pelos processos erosivos, podem ser transportados em direção aos canais ou depositados nas encostas, estando sujeitos a capacidade de transporte e à conectividade entre áreas fonte de sedimentos até o exutório.

A erosão bruta ou total de uma determinada área, responsável pela disponibilização de sedimentos, é dada pela soma de todas as formas de erosão, sendo elas, a erosão em entressulcos (laminar), a erosão em sulcos (ravinas) e a erosão nas margens dos canais fluviais. O primeiro agente de desagregação de partículas do solo é o efeito do salpicamento ou efeito *splash* causado pelo impacto das gotas da chuva. A ação deste fator é condicionada pela energia da chuva (WISCHMEIER, 1959; MOUZAI et al., 2003), pela susceptibilidade a erosão de cada tipo de solo (erodibilidade) (WISCHMEIER; SMITH, 1978), cobertura do solo pela vegetação que age como proteção da superfície diminuindo a erosão (LAL, 2001) (TABELA 1) e umidade do solo (LUK, 1985).

TABELA 1 – TAXAS DE EROSÃO EM DIFERENTES USOS DA TERRA

Localização	Uso da terra	Erosão (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Fonte
Londrina-PR	Solo descoberto	90	Rufino e Biscaia (2000 apud Thomaz et al., 2011)
Guarapuava-PR	Agricultura	1,07 - 6,1	Thomaz (2007)
Itainópolis-SC	Estrada não pavimentada	4,1 - 5,2	Corrêa e Roloff et al. (2010)
Rio Negrinho-SC	Plantio de <i>pinus</i>	0,1	Grando et al. (2008)
Guarapuava-PR	Floresta	0,2	Thomaz, 2005

FIGURA 4 - VELOCIDADE DE ESCOAMENTO PARA OCORRÊNCIA DE EROSÃO, TRANSPORTE E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS EM FUNÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS



FONTE: Modificado de Morgan (2005)

Quando ocorre escoamento superficial, os fatores mais importantes para a erosão são o comprimento de rampa e a declividade. Esta relação é importante por condicionar a altura e a velocidade do escoamento e, portanto, a energia responsável pela erosão (HUDSON, 1971). A FIGURA 4 mostra os limiares de velocidade de escoamento para que ocorra erosão, transporte e deposição de sedimentos, de acordo com estudo realizado por Hjulström (1935¹ apud MORGAN, 2005) em canais fluviais. Nota-se a dependência que existe entre a velocidade de escoamento e a condição de transporte ou deposição das partículas. A variação na velocidade, causando a deposição ou o aumento do transporte, pode ser percebida entre diferentes áreas, em que ocorrem declividades e capacidades distintas de geração de escoamento, e também numa mesma área durante a evolução do evento de precipitação.

No entanto, apenas uma parte dos sedimentos disponibilizados pela erosão bruta compõe a produção de sedimentos, sendo que, parte dos sedimentos são depositados ao longo das encostas, planícies de inundação e no canal fluvial. A produção de sedimentos é então dada como uma porcentagem da erosão bruta definida por uma taxa de transferência.

¹ HJULSTRÖM, F. Studies of the morphological activity of Rivers as illustrated by the River Fyries. **Bulletin of the Geological Institute**. p. 221-527, 1935.

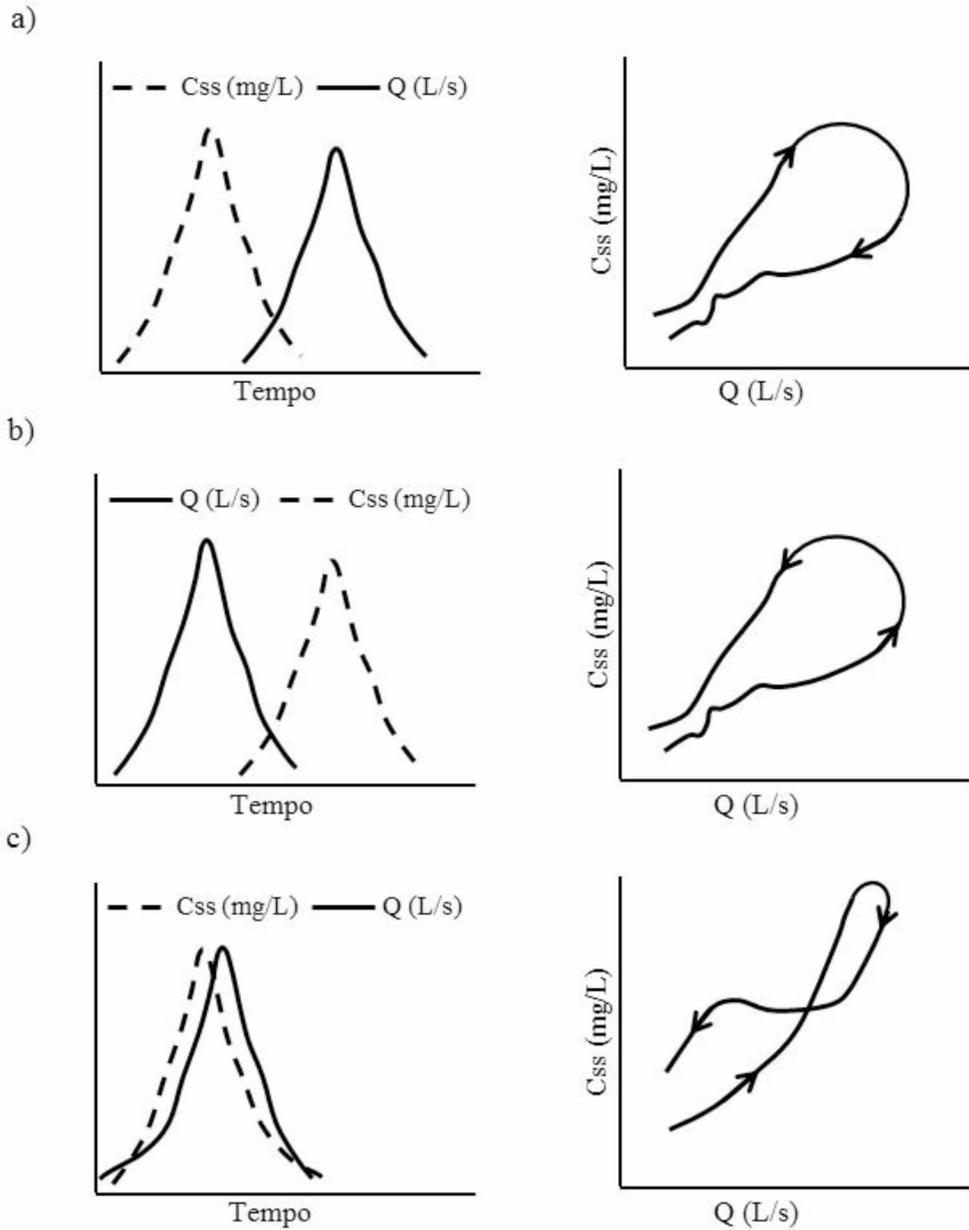
Segundo Walling (1983), a taxa de transferência é condicionada por diversos fatores geomorfológicos, como características do relevo e padrões de drenagem, e condições ambientais, como a localização e tamanho da fonte de sedimentos, cobertura vegetal e textura do solo. Diversos estudos consideram a área de drenagem como fator dominante (CARVALHO, 1994), sendo que, de forma geral esta relação é encontrada devido às características topográficas, que tendem a aumentar a proporção de relevos planos com aumento das planícies de inundação e diminuição da declividade do canal, fatores que propiciam a deposição de sedimentos. Sendo assim, observa-se uma relação inversamente proporcional entre a taxa de transferência e a área de drenagem. No entanto, a relação entre produção de sedimento e área de drenagem pode ser mais complexa considerando que aumento da área de drenagem pode ter como consequência a mudança dos processos erosivos predominantes, no uso e cobertura da terra e características geomorfológicas. Vente et al. (2007) ao abordar o efeito da escala na transferência de sedimentos observaram que na escala de encosta, em que predominam a erosão por salpicamento e laminar, a produção de sedimentos é baixa e com o aumento da área de drenagem os processos de erosão em ravinas, voçorocas e no canal de drenagem tem maior atuação, resultando no aumento da produção de sedimentos. Essa tendência de aumento da produção de sedimentos se mantém até que o aumento da área de drenagem tenha como consequência a incorporação de áreas de menor declividade, com presença mais frequente de deposição de sedimentos, que revertem a tendência.

3.2.1. Histerese entre vazão e concentração de sedimentos

A concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}), apesar de depender da vazão (Q), pode sofrer efeito de histerese. Esse efeito consiste na ocorrência de valores da C_{ss} diferentes para um mesmo valor de Q durante a ascensão e a recessão do hidrograma. A histerese na relação entre Q e C_{ss} pode apresentar, além da relação unívoca, três formas de curvas de histerese, sendo elas, laço em sentido horário, laço em sentido anti-horário, e laço em oito (WILLIAMS, 1989) (FIGURA 5).

Os estudos pioneiros na área do transporte fluvial de sedimentos identificaram e enfatizaram a importância desse efeito, que resulta em transporte de sedimentos diferente nos ramos ascendente e descendente das vazões, pela consequência de trazer grandes incertezas na definição da produção de sedimentos, frequentemente obtido por equações que utilizam a vazão como variável explicativa.

FIGURA 5 – TIPOS DE LAÇOS DE HISTERESE OBSERVADOS NA RELAÇÃO VAZÃO CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS



FONTE: Minella et al. (2011).

LEGENDA: a) Laço horário. b) Laço anti-horário. c) Laço em formato de oito.

A ocorrência da histerese é influenciada pela proximidade da fonte de sedimentos (WILLIAMS, 1989), granulometria do material presente nas fontes (LENZI; MARCHI, 2000) exaustão dos suprimentos de sedimentos em eventos com mais de um pico de vazão (SMITH e DRAGOVICH, 2009), diminuição da intensidade da precipitação durante a recessão do hidrograma (GREGORY; WALLING, 1973), erodibilidade e cobertura do solo (ZABALETA et al., 2007) tamanho da bacia hidrográfica e umidade antecedente (KLEIN, 1984; BOER; CAMPBELL, 1989)

O laço em sentido horário é consequência de eventos em que o pico de C_{ss} ocorre antes do pico de Q . Esse comportamento é observado quando os sedimentos são mobilizados, transportados e depositados rapidamente. O laço em sentido horário está relacionado a geração de escoamento e mobilização de sedimentos provenientes de áreas próximas ao canal de drenagem (SEEGER et al., 2004; SANTOS, 2009). Esse tipo de laço pode também ser explicado pela exaustão do estoque de sedimentos e aumento da vazão proveniente do escoamento de base, causando assim, efeito de diluição (WALLING; WEBB, 1982; MINELLA et al., 2011). De acordo com Seeger et al. (2004) o laço em sentido horário é mais comum em eventos com baixa C_{ss} e alto coeficiente de escoamento.

No laço em sentido anti-horário o pico de C_{ss} ocorre depois do pico de Q . Esse laço é interpretado como sendo resultado da contribuição de sedimentos que são mobilizados nas vertentes e transferidos pelo escoamento superficial para o canal fluvial. Esse comportamento é explicado pela velocidade de transporte dos sedimentos pelo escoamento, que é mais lenta nas encostas quando comparada ao canal de drenagem (WILLIAMS, 1989). Desta forma, esse tipo de evento ocorre pela contribuição de sedimentos provenientes de porções da bacia que não são constantemente conectadas ao canal, quando é gerado escoamento superficial em grandes porções da bacia, e, portanto, apenas sob condições de grande umidade e precipitação (SEEGER et al., 2004).

O laço em oito é formado pela combinação dos laços horário e anti-horário. Conforme Williams (1989), isto ocorre quando a C_{ss} e Q iniciam a ascensão aproximadamente juntas, e a C_{ss} atinge o pico primeiro, produzindo um laço horário. Depois de atingido o pico de C_{ss} a disponibilidade e o transporte de sedimentos são suficientemente elevados para que Q decresça mais rápido do que C_{ss} produzindo o laço anti-horário. Seeger et al. (2004) destaca que o laço em oito é pouco frequente por exigir que ocorra uma condição inicial de escoamento gerado exclusivamente próximo ao canal de drenagem evoluindo para geração de escoamento superficial e intensa erosão para manter C_{ss} alto mesmo com a queda de Q .

Uma mesma bacia hidrográfica pode apresentar mais de um tipo de laço de histerese devido a ocorrência de precipitação com grande variação de intensidade e altura (SEEGER et al., 2004) ou mudanças de uso e cobertura que influenciem a proximidade da fonte de sedimentos, como a construção de estradas (WALLING; GREGORY, 1970)

O fato de os laços de histerese, serem dependentes de características fisiográficas, mecanismos de geração de escoamento e indicar a conectividade do transporte de sedimentos,

torna-os uma importante característica do comportamento de bacias hidrográficas, sendo possível interpretar a transferência de sedimentos a partir de suas fontes até o exutório durante eventos hidrológicos.

3.3. DEFINIÇÃO DE FONTES DE SEDIMENTO E CONECTIVIDADE COM CANAIS DE DRENAGEM POR MEIO DE CARACTERÍSTICAS DOS SEDIMENTOS

A necessidade de identificação de fontes de sedimentos e compreensão dos processos que propiciam a transferência de sedimentos ao longo das bacias hidrográficas, e o advento dos avanços tecnológicos que permitiram a determinação de características físicas e químicas dos sedimentos causaram um aumento relevante dos estudos de proveniência de sedimentos por meio de técnicas de traçadores (WALLING, 2013). Essas técnicas assumem que é possível diferenciar cada uma das prováveis fontes de sedimentos com base em características físicas ou químicas e que a comparação entre essas características observadas nos sedimentos em suspensão e no material das fontes possibilitam a determinação da importância de cada fonte (COLLINS; WALLING, 2004).

Nos estudos utilizando traçadores as fontes podem ser definidas de diversas formas. Podem ser consideradas por sua localização dentro da bacia hidrográfica, como a contribuição de sub-bacias ou áreas de diferentes usos da terra, ou então por tipo de processo erosivo predominante, que removem porções superficiais do solo no caso da erosão entre sulcos e subsuperficiais na erosão em ravinas e voçorocas (WALLING et al., 2013). Sendo assim, para a identificação das fontes que contribuem para a produção de sedimentos primeiramente é necessário que seja feita a seleção de características químicas ou físicas que diferenciem as possíveis fontes de sedimentos para finalmente comparar os valores da mesma propriedade obtida nos sedimentos para estabelecer a contribuição de cada fonte de sedimentos. (WALLING, 2013).

A seleção das propriedades deve refletir os diferentes controles ambientais presentes nas fontes (WALLING et al., 1993). Diversas características dos sedimentos podem ser usadas como traçadores. Dentre as características utilizadas com sucesso na discriminação de fontes de sedimentos estão os elementos químicos maiores e traços, mineralogia, radionuclídeos, propriedades magnéticas, composição isotópica da fração orgânica e cor dos sedimentos são propriedades (MUKUNDAN et al., 2012).

Em pequenas áreas de drenagem as fontes de sedimento se diferenciam, predominantemente, pelo uso do solo, características do solo e o tipo de processo erosivo que pode mobilizar partículas da superfície do solo ou de horizontes subsuperficiais. Nesse contexto, uma das propriedades de considerável potencial de diferencial de fontes é o carbono presente na matéria orgânica (WALLING et al., 1993).

A matéria orgânica do solo (MOS) é definida como todo material orgânico de origem vegetal ou animal, como a liteira, fragmentos parcialmente decompostos, biomassa microbiana, compostos orgânicos e material orgânico estabilizado (STEVENSON, 1994). Na análise de solos, a matéria orgânica mais comumente analisada é a porção com tamanho inferior a 2 mm, excluindo o material não decomposto depositado na superfície do solo (DICK *et al.*, 2009).

De forma geral, as medidas de matéria orgânica muito correlacionadas ao teor de carbono orgânico pelo fato de a quantidade de carbono presente nas estruturas orgânicas ser conhecida e por possuir pouca variação dentro de um mesmo solo (DICK; MARTINAZZO, 2012). Assim, quando se refere ao transporte e a distribuição espacial, a variação de matéria orgânica é proporcional a observada no teor de carbono orgânico.

A MOS pode ser dividida de acordo com sua localização dentro do solo em: orgânica dissolvida (MOD); matéria orgânica associada aos minerais (MOAM); e matéria orgânica particulada (MOP) (BALDOCK; BROOS, 2012). A MOD representa pequena proporção da matéria orgânica presente no solo. É operacionalmente definida como a parte da matéria orgânica que passa por filtro de 0,45 μm . A MOP corresponde ao material orgânico pouco decomposto e apresenta estrutura semelhante aos fragmentos vegetais e animais de origem. A MOAM é aquela que interage com a superfície dos minerais formando complexos organominerais. Esses complexos aumentam a estabilidade da matéria orgânica diminuindo a sensibilidade do estoque ao uso e manejo do solo (BALDOCK; BROOS, 2012). Desta forma, as mudanças de uso e manejo do solo, tem impacto maior na MOP.

A quantidade de MOS é definida pelo balanço entre as entradas e perdas de matéria orgânica. A entrada de matéria orgânica ocorre pela incorporação de material, em maior parte vegetal, que se desenvolve sobre o solo. A cobertura do solo é então um importante fator de controle da quantidade de matéria orgânica. Bertol e Santos (1995) encontraram, para um mesmo tipo de solo, em plantio de pinus teores de matéria orgânica 30% inferiores em relação à mata nativa.

As perdas podem ocorrer por processos de mineralização e erosão. A mineralização é um processo natural que consiste na decomposição de matéria orgânica e conversão do carbono orgânico em CO₂ pela ação de microrganismos. Como esse processo depende da presença de oxigênio, as condições de saturação de água no solo são determinantes para o estoque de carbono (BEYER et al., 1993). As áreas saturadas têm características topográficas que proporcionam concentração de escoamento superficial e subsuperficial tendo como efeito, além da saturação, o transporte de resíduos orgânicos que aumentam a quantidade de matéria orgânica disponível (PEI et al., 2010). Nesses ambientes a matéria orgânica presente é tanto a originada pela decomposição do material depositado pela vegetação local quanto a matéria orgânica transportada das vertentes (DICK; MARTINAZZO, 2012). Dessa forma, os fatores topográficos e a cobertura vegetal definem a quantidade e a distribuição das frações da MOS em cada porção da paisagem.

TABELA 2 – TRANSPORTE DE CARBONO ORGÂNICO EM SUSPENSÃO EM PEQUENAS BACIAS

Localização	Área da drenagem (ha)	CO* (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Fonte
Suíça	74	140	Smith et al. (2013)
Reino Unido	38	1950	Evans et al. (2006)
Reino Unido	83	310	Evans et al. (2006)
Porto Rico	1,6	6,47	McDowell e Asbury (1994)
Brasil	1	17,6	Johnson et al. (2006)

NOTA:* Carbono orgânico particulado e associado a minerais

O transporte da MOD (COD) é dependente dos processos hidrológicos subsuperficiais e subterrâneos ao passo que seu transporte depende dos processos que interagem diretamente com a solução do solo (MEYER; TATE, 1983). A dinâmica de MOP e MOAM, por outro lado, é dependente dos processos superficiais tendo relação próxima à dinâmica do transporte de sedimentos. Valores anuais de transporte de carbono orgânico em suspensão (MOP+MOAM) são apresentados na TABELA 2.

Os processos erosivos agem na dispersão de agregados, resultando em partículas individualizadas e micro agregados que são transportados pelo escoamento superficial. O processo de mobilização de partículas pelo impacto das gotas da chuva (*splash*), que inicia o transporte de material particulado, causa a seleção do material do solo. Esse processo resulta

em enriquecimento dos sedimentos em matéria orgânica (BEGUERÍA et al., 2015). Rhoton et al. (2006) e Wang et al. (2010) observaram enriquecimento de carbono de 1,2 a 3 vezes em sedimentos transportados. Essas partículas, por possuir menor densidade, são mais facilmente transportadas. Boix-Fayos et al. (2015) observaram que depósitos de sedimentos possuem, em média, 50% menos carbono do que os solos dos quais os sedimentos são provenientes. Isso ocorre porque as frações mais ricas em carbono são transportadas com mais facilidade pelo canal, ocorrendo pouca deposição.

A proporção de carbono em relação aos sólidos suspensos totais é variável no tempo. Dessa forma, no transporte em encostas observa-se a tendência de redução da concentração de carbono com o aumento da produção de sedimentos, apresentando forte correlação com a intensidade da precipitação. Boix-Fayos et al. (2015) afirmam que ocorre aumento na proporção de MOAM nos sedimentos transportados em relação aos solos apresentando, no entanto, variação em eventos de diferentes magnitudes.

Durante os períodos com menor vazão, os sedimentos transportados nos canais são aqueles com maior teor de matéria orgânica, como horizonte orgânico do solo e fragmentos vegetais da zona ripária. A entrada de material mineral, com baixo teor de matéria orgânica, proveniente da erosão mais intensa durante os períodos de vazões altas reduz a proporção de carbono orgânico (MEYBECK; MOATAR, 2014). A identificação do transporte de carbono orgânico relacionada ao material particulado em bacias hidrográficas, com foco na conexão entre fonte, passa, portanto, pela determinação do fluxo total e da determinação da concentração de carbono nas frações particulada e associada a minerais.

O transporte da matéria orgânica associada aos sedimentos apresenta características que denotam a importância da abordagem da conectividade para compreender sua dinâmica. Enquanto em experimentos realizados em pequenas parcelas são observadas poucas variações da concentração de carbono orgânico nos sedimentos, havendo forte dependência da área fonte, (JACINTHE et al., 2002), em bacias hidrográficas a magnitude dos eventos modifica a quantidade de carbono exportado (JACINTHE et al., 2004; MEYBECK, 2014) por haver contribuição de sedimentos de diferentes porções da bacia (MOATAR, 2014).

Apesar do uso de um único traçador ser capaz de descartar a contribuição de uma determinada fonte não possibilita a discriminar entre as demais fontes (WALLING et al., 1993). Dessa forma o uso de característica única pode com frequência levar a interpretações pouco confiáveis da fonte de sedimentos (COLLINS; WALLING, 2004). Nesse sentido, a

interpretação sobre as fontes de sedimentos deve sempre ser realizada com base em um conjunto de características das possíveis fontes presentes na área de estudo.

3.4. MODELAGEM DISTRIBUÍDA DE EROSÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA ESCALA DE BACIA

O estudo de erosão, transporte e deposição de sedimentos, para possibilitar o incremento de conhecimento de seus fatores condicionantes, necessita de uma abordagem em escala de espaço e tempo, compatíveis com os processos envolvidos (MERRITT et al., 2001). Os primeiros estudos que desenvolveram modelos de previsão de erosão eram concentrados, baseados em relações empíricas e não consideravam variações temporais das condições hidrológicas. Nessa perspectiva enquadra-se a Equação Universal de perda de Solos (EUPS) (WISCHMEIER; SMITH, 1978) amplamente utilizada na estimativa de erosão média anual. Com a evolução da compreensão dos processos físicos da dinâmica da água e seu efeito nos processos erosivos, aumento da capacidade de processamento de dados e o desenvolvimento dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), foram desenvolvidos modelos fisicamente baseados e espacialmente distribuídos (MERRITT et al., 2001). Exemplos desses modelos são: *Watershed Erosion Prediction Project* (WEPP) (Lafren et al., 2001); *European Soil Erosion Model* (EUROSEM) (MORGAN et al., 1998); *Limburg Soil Erosion Model* (LISEM) (DE ROO et al., 1996); e *Topography Model* (TOPOG) (VERTESSY; ELSENBEER, 1999).

A impossibilidade de medir diretamente todas as variáveis envolvidas nos processos hidrossedimentológicos torna necessária a utilização de modelos para representar a bacia hidrográfica, e assim, extrapolar as medições e avaliar o comportamento de determinadas variáveis em escalas de espaço e tempo mais amplas (BEVEN, 2001). Nesse sentido, os modelos distribuídos têm a capacidade de descrever os processos hidrossedimentológicos ao longo das bacias hidrográficas e simular a interação de entre porções das encostas e dessas com os canais de drenagem, considerando as variações na conectividade do escoamento e sedimentos.

O LISEM é um modelo fisicamente baseado e concebido para realizar a simulação de escoamento superficial e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas durante evento de precipitação (DE ROO et al., 1996). O modelo foi concebido em linguagem de programação integrada ao SIG PCRaster (KARSSENBERG et al., 2010), fazendo com que todas as variáveis sejam informadas em formato de malha retangular (*raster*), sendo assim totalmente distribuído.

O modelo tem como saídas, as séries temporais e mapas referentes ao balanço hídrico e ao transporte de sedimentos. Outra vantagem deste modelo é a possibilidade de edição de todas as variáveis de entrada de forma espacialmente distribuída tornando o modelo versátil e aplicável em áreas com diversas condições climáticas, pedológicas e extensão espacial (TABELA 3).

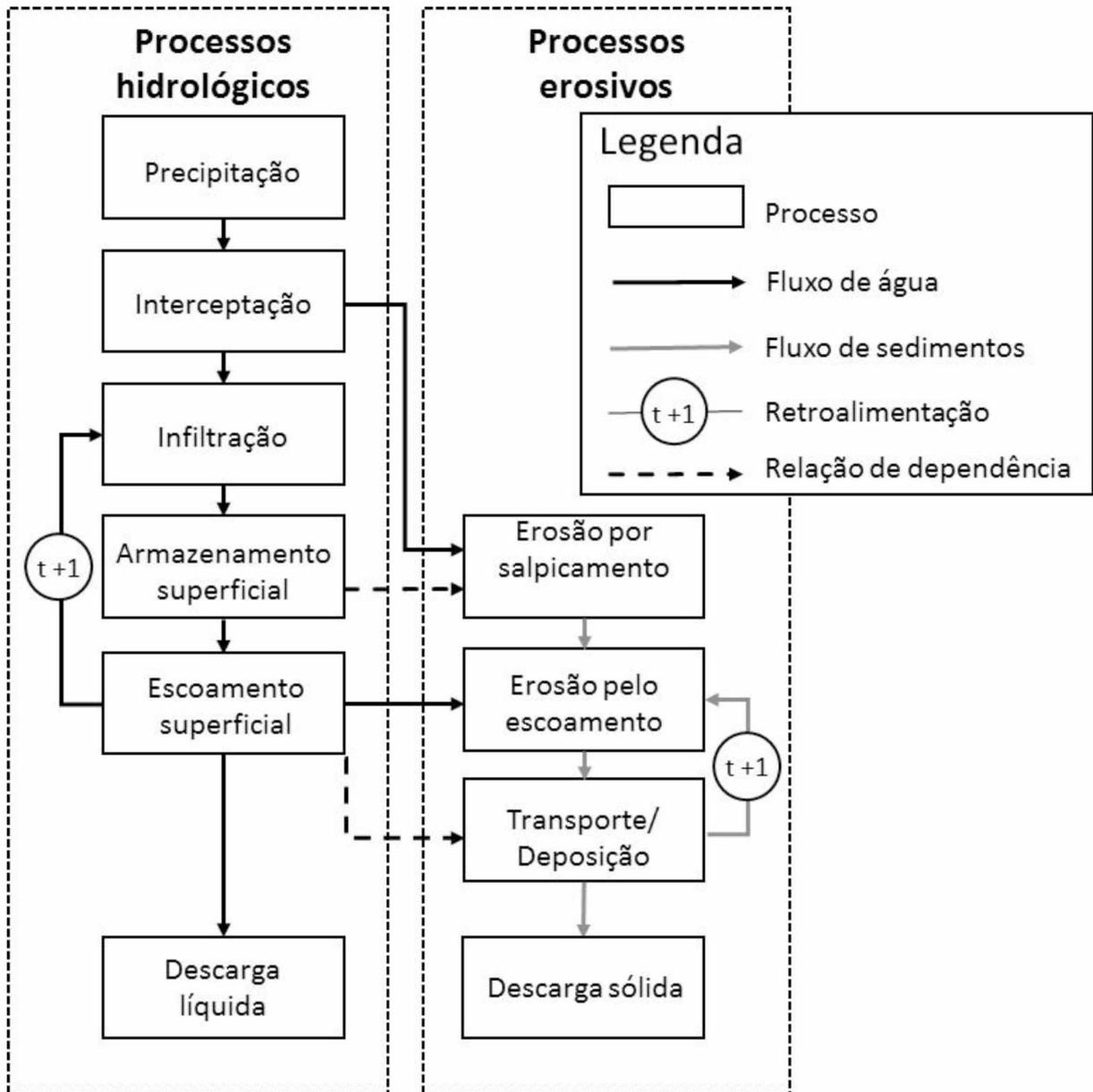
TABELA 3 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO MODELO LISEM

Localização	Precipitação Anual (mm)	Altitude (m)	Área de drenagem (km ²)	Uso predominante	Fonte
Alemanha	990	130-380	54	Agricultura	Hölzel e Dieckkrüger (2011)
Bélgica	740	79-132	2,9	Agricultura	Takken et al. (1999)
Brasil	1605	560-740	1,19	Agricultura	Barros et al. (2014)
Brasil	1440	-	0,9	Plantio <i>eucalyptus</i>	Rodrigues et al. (2014)
Brasil	1440	-	0,3	Plantio <i>eucalyptus</i>	Rodrigues et al. (2014)
Brasil	1570	-	4,7	Pastagem	Gomes et al. (2008)
Brasil	1515	969-968	0,000167	Estrada não pavimentada	Schultz (2013)
China	562	1000-1350	3,5	Agricultura/pastagem	Liu et al. (2003)
Espanha	1500	-	18	Nativa arbustiva	Rodríguez-Caballer et al. (2015)
Holanda	740	80-110	0,42	Agricultura	Sheikh et al. (2010)
Tanzânia	1271	1302-1500	5,7	Agricultura	Hessel et al. (2006)
Tanzânia	1013	1336-1824	2	Agricultura	Hessel et al. (2006)

Os processos considerados no modelo LISEM são apresentados na FIGURA 6. Os processos são: precipitação, interceptação, armazenamento superficial em micro depressões, infiltração, movimento vertical da água no solo, escoamento superficial, escoamento em canal, erosão por salpicamento, erosão pelo escoamento superficial e a capacidade de transporte do escoamento (DE ROO et al., 1996). Destaca-se que, tanto o escoamento quanto o transporte de sedimentos são propagados ao longo das encostas, considerando a ocorrência de infiltração e o

balanço transporte/deposição. Outra característica importante é a simulação independente da erosão por salpicamento e por escoamento.

FIGURA 6 – FLUXOGRAMA DE SIMULAÇÃO DO MODELO LISEM.



FONTE: Modificado de De Roo e Jetten (1999)

Apesar do modelo LISEM ser fisicamente baseado existe a necessidade de calibração para que possa reproduzir de forma adequada a vazão e o transporte de sedimentos. Os parâmetros mais sensíveis a calibração são: condutividade hidráulica, coeficiente de rugosidade e umidade inicial (SHEIKH et al., 2010; BAARTMAN, et al., 2011). Alguns trabalhos

realizaram adicionalmente calibração de parâmetros de coesão do solo e diâmetro mediano de partículas para a calibração da produção de sedimentos (BAARTMAN, et al., 2011). No processo de calibração, Schultz (2013) e Rodrigues et al. (2014), verificaram que o modelo tem resultados menos satisfatórios para eventos de pequena magnitude.

Em relação ao uso dos resultados de forma espacializada Takken et al. (1999) verificou que é necessário realizar a validação identificando dentro da bacia áreas de maior erosão e deposição como em barreiras de vegetação e áreas próximas às estradas. Buscando avaliar a qualidade espacial das previsões do modelo alguns estudos empregam o monitoramento em bacias embutidas, para assim avaliar os processos em áreas específicas dentro da bacia simulada (TAKKEN et al., 1999; LIU et al., 2003; RODRIGUES et al., 2014).

Uma das limitações do LISEM refere-se à necessidade de grande número de parâmetros de entrada. De acordo com De Roo et al. (1996), podem ser necessários até 24 mapas representando parâmetros específicos da área de estudo. Além disso, Hessel (2005) destaca que o modelo é bastante sensível à resolução temporal dos dados de precipitação e da escala da informação topográfica. Isso ocorre por essas variáveis influenciarem diretamente na magnitude dos processos, determinando a intensidade da precipitação e a declividade das encostas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no município de Rio Negrinho/SC (Figura 7). A geologia da região é composta por sedimentos paleozoicos, sendo que na área de estudo são identificadas rochas da formação Rio do Sul, pertencentes ao grupo Itararé (EPAGRI/CIRAM, 2006). De acordo com CPRM (1986² apud BOGNOLA, 2007), a formação Rio do Sul em Santa Catarina, tem sua porção inferior constituída de folhelhos e argilitos cinza-escuros e sobre estes aparecem diamictitos acinzentados, com matrizes arenosas, intercaladas com arenitos muito finos. Os arenitos são recobertos por folhelhos, normalmente várvidos, argilitos, ritmitos e siltitos.

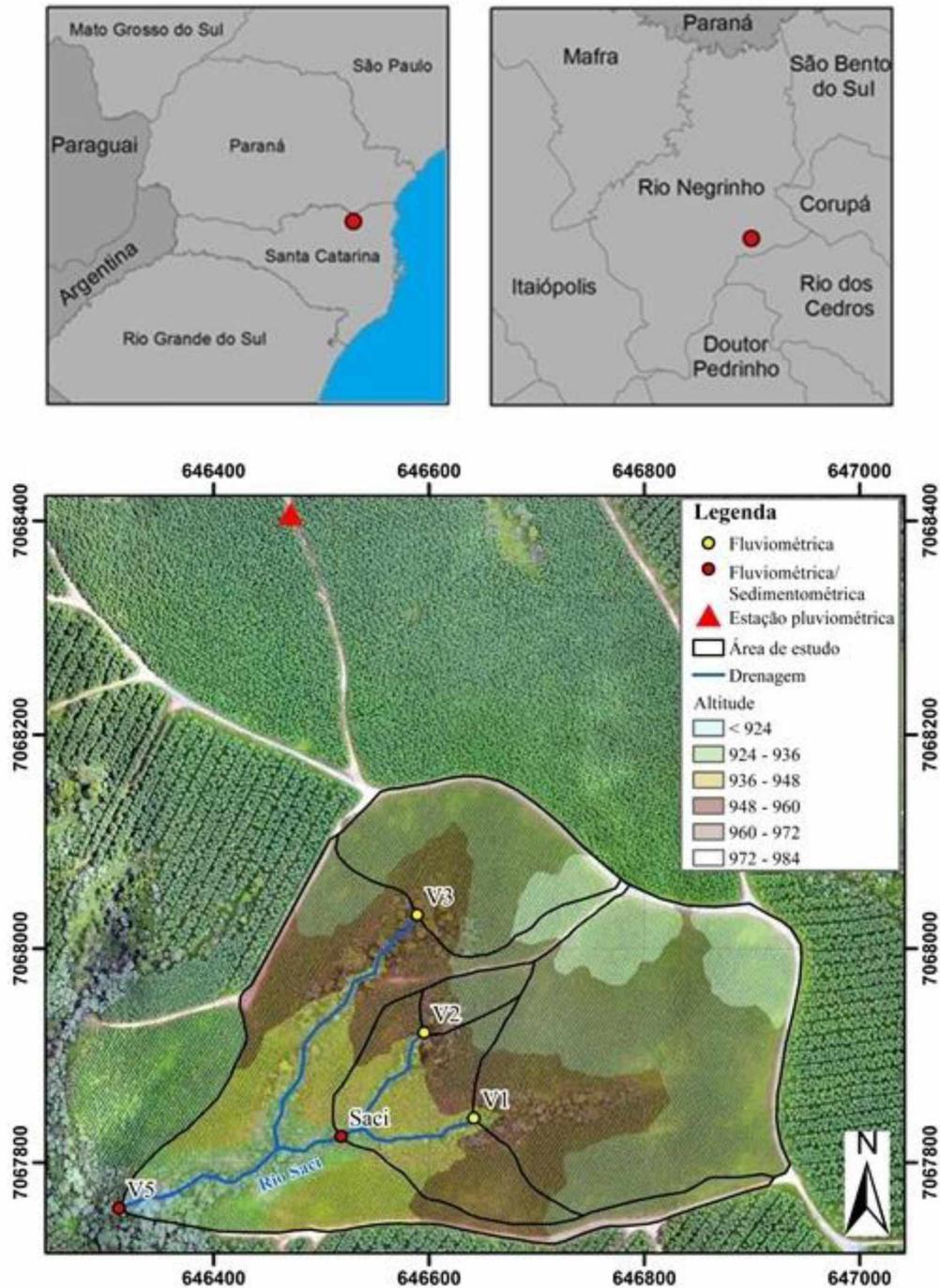
Os solos predominantes na região são os Cambissolos, caracterizados pelo horizonte B incipiente, baixo gradiente textural, média e alta relação silte/argila (DALAGNOL, 2001). Esses cambissolos encontrados no município de Rio Negrinho/SC foram caracterizados por BOGNOLA (2007) que identificou solos derivados de arenito ou de folhelho, com textura média a argilosa sem presença de cascalho, predomínio de argila de alta atividade e elevados teores de matéria orgânica superficial e subsuperficial presente até pelo menos 50 cm de espessura.

Para a área de estudo, Santos (2009) definiu um perfil longitudinal ao longo do talvegue da bacia no qual identificou o limite entre a camada de solo, folhelho e arenito (FIGURA 8). Nas encostas ocorre contato da camada de solo com folhelho, enquanto nas áreas próximas aos canais, o solo desenvolve-se diretamente sobre o arenito. Os canais de drenagem são predominantemente caracterizados por margens em contato com camada pouco espessa de solo e fundo rochoso, ocorrendo depósitos de sedimentos nos segmentos de menor declividade.

Na região predomina o clima temperado constantemente úmido sem estação seca, com temperatura média anual variando entre 15,5°C a 17°C, precipitação pluviométrica total anual variando de 1.360 a 1.670 mm, que se distribui em 138 a 164 dias chuvosos. A umidade relativa do ar pode variar de 80 a 86% (EPAGRI/CIRAM, 2006).

² DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. Atlas Geológico. Descrições geomorfológicas do Estado de Santa Catarina, 1986.

FIGURA 7 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

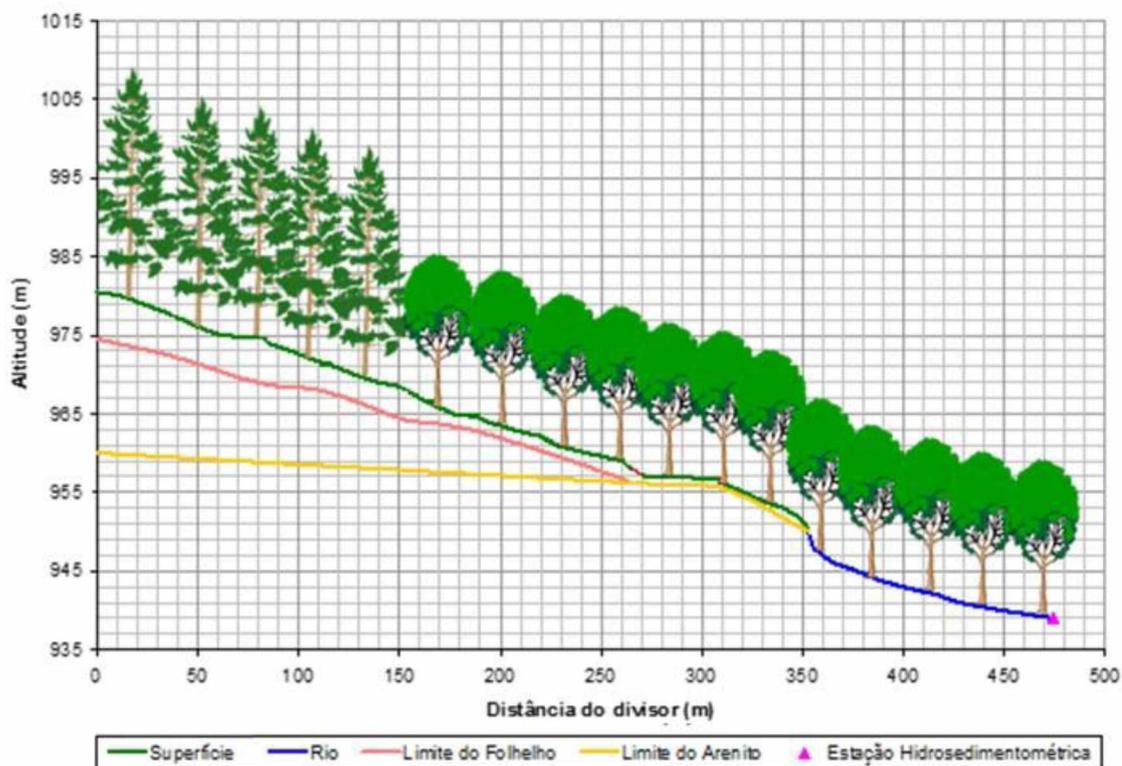


FONTE: O autor (2017)

A principal atividade econômica da região está ligada às indústrias madeireiras e produção de papel e celulose. Por essa razão o uso da terra na área de estudo é composto por plantio de *Pinus taeda*, floresta nativa em zona riparia e estradas não pavimentadas (FIGURA 9). Na área de reflorestamento, foi realizado o corte raso do plantio anterior, composto por *Pinus taeda* com idade de 30 anos, seguido pelo plantio de novas mudas da mesma espécie,

atualmente com três anos de idade. Durante o período de monitoramento não foram realizadas atividades de manejo florestal.

FIGURA 8 – PERFIL LONGITUDINAL COM REPRESENTAÇÃO DA PROFUNDIDADE DA CAMADA DE SOLO, FOLHELHO E ARENITO NO TALVEGUE DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: Santos (2009)

Nesse estudo foram monitoradas cinco bacias experimentais embutidas com áreas variando de 0,4 a 18,5 ha (TABELA 4). A altimetria da área de estudo foi obtida por Hung et al. (2017, submetido à publicação) por meio de levantamento fotogramétrico utilizando veículo aéreo não tripulados (VANT), com o qual foi gerado um modelo digital do terreno em escala 1:5.000 e resolução com resolução espacial de 1m. O uso e cobertura da terra foi obtido por meio da interpretação das imagens do levantamento e posterior confirmação em campo (FIGURA 10).

Na área de estudo as estradas estão localizadas em divisores, presentes quase na totalidade do limite da área de drenagem (FIGURA 10). Na estrada localizada no limite leste e norte da bacia, o leito tem aplicação de cascalho. O restante das estradas foi construído pela modelação do solo local. O escoamento gerado no leito das estradas é drenado para as porções

laterais das estradas (sarjetas) e então para dispositivos de drenagem, chamados de saídas d'água, sangras ou bigodes, por meio dos quais o escoamento é transferido para as encostas. Dessa forma, apesar de haver a proximidade entre estradas e encostas, as áreas em que pode haver influência de escoamento gerado em estradas localiza-se apenas a jusante dos seis dispositivos de drenagem ao longo das estradas.

FIGURA 9 - USO E COBERTURA DO SOLO DA ÁREA DE ESTUDO.



FONTE: O autor (2017)

LEGENDA: a) Visão geral da área com predomínio do plantio de pinus e faixa de zona ripária ao centro. b) Vegetação nativa em zona ripária. c) Estrada desativada com desenvolvimento de ravina. d) Estrada não pavimentada.

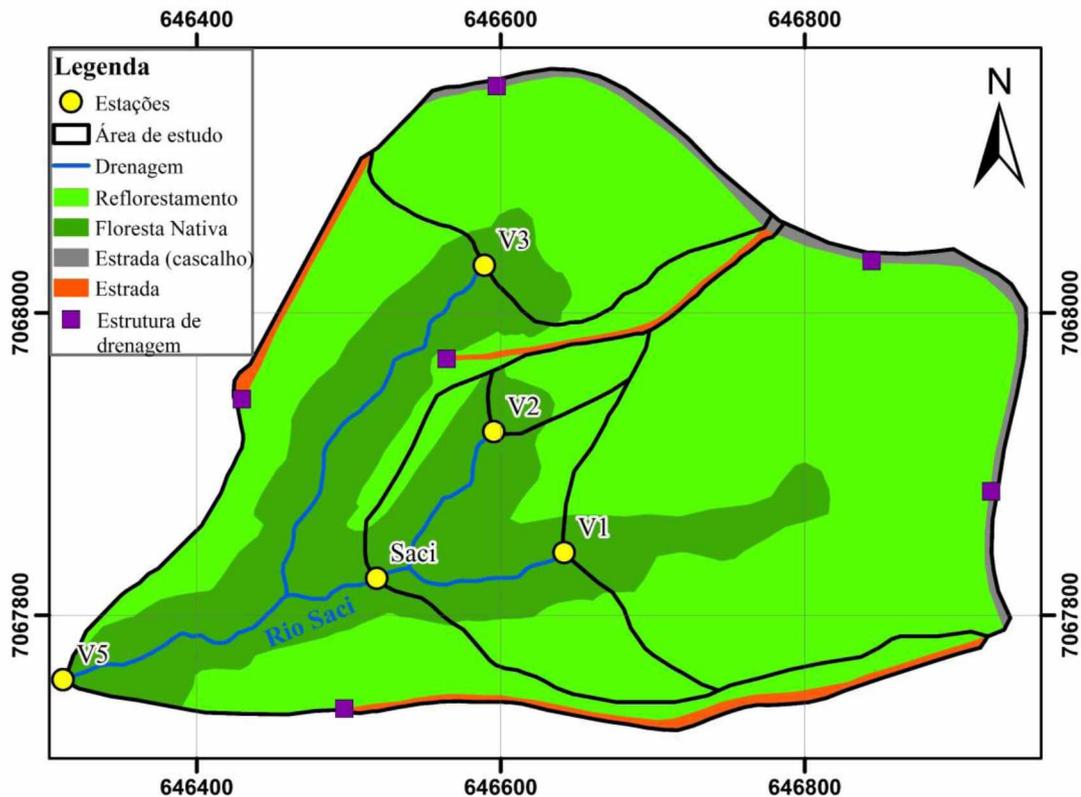
TABELA 4 – RESUMO DE INFORMAÇÕES SOBRE ÁREAS MONITORADAS

Nome	Descrição	Área (ha)	ΔH (m)*	Declividade média (%)	Uso da terra (%)		
					Estrada	<i>Pinus</i>	Vegetação nativa
V1	Nascente	6,8	29	12,2	3,5	87,7	8,8
V2	Nascente	0,4	21	20,1	0,0	67,4	32,6
V3	Nascente	2,7	25	15,1	5,7	84,0	10,3
Saci	Estação rio Saci	9,5	41	14,5	2,5	75,8	21,7
V5	Jusante rio Saci	18,5	56	17,1	4,6	68,5	27,0

FONTE: O autor (2017)

NOTA: *Amplitude altimétrica

FIGURA 10 – USO E COBERTURA DA TERRA NA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: O autor (2017)

4.2. MONITORAMENTO DE ESCOAMENTO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Para a caracterização dos eventos hidrológicos é necessário que a aquisição de dados seja feita com frequência que permita registrar as variações de intensidade da precipitação, escoamento e transporte de sedimentos. O registro de precipitação foi realizado em uma estação pluviométrica (FIGURA 11) equipada com pluviômetro de básculas *WATERLOG H-340*, com registro automático no intervalo de tempo de 10 minutos e resolução de 0,25 mm. Essa estação está localizada a 280 m da área de estudo (FIGURA 7).

Nas estações fluviométricas o monitoramento da vazão foi feito por meio de sensores de nível associados a estruturas regulares (FIGURA 12). A instalação de estruturas facilita a determinação da vazão por possuir relação cota x vazão conhecida e constante por não sofrer mudança na forma da seção. A estação hidrossedimentológica do rio Saci (TABELA 4) foi instalada por Santos (2009) e possui estrutura de vertedor (triangular + calha Parshall + vertedor

retangular) que permite medir com precisão uma ampla faixa de variação de vazões. Nos demais pontos de monitoramento foram utilizados vertedores triangulares, com abertura de 90°, confeccionados em chapas metálicas (FIGURA 12). A instalação consistiu na inserção do vertedor no leito do canal e aplicação de cimento para evitar movimentação e vazamentos (FIGURA 13a).

FIGURA 11 – PLUVIÔMETRO UTILIZADO PARA O REGISTRO AUTOMÁTICO DA PRECIPITAÇÃO



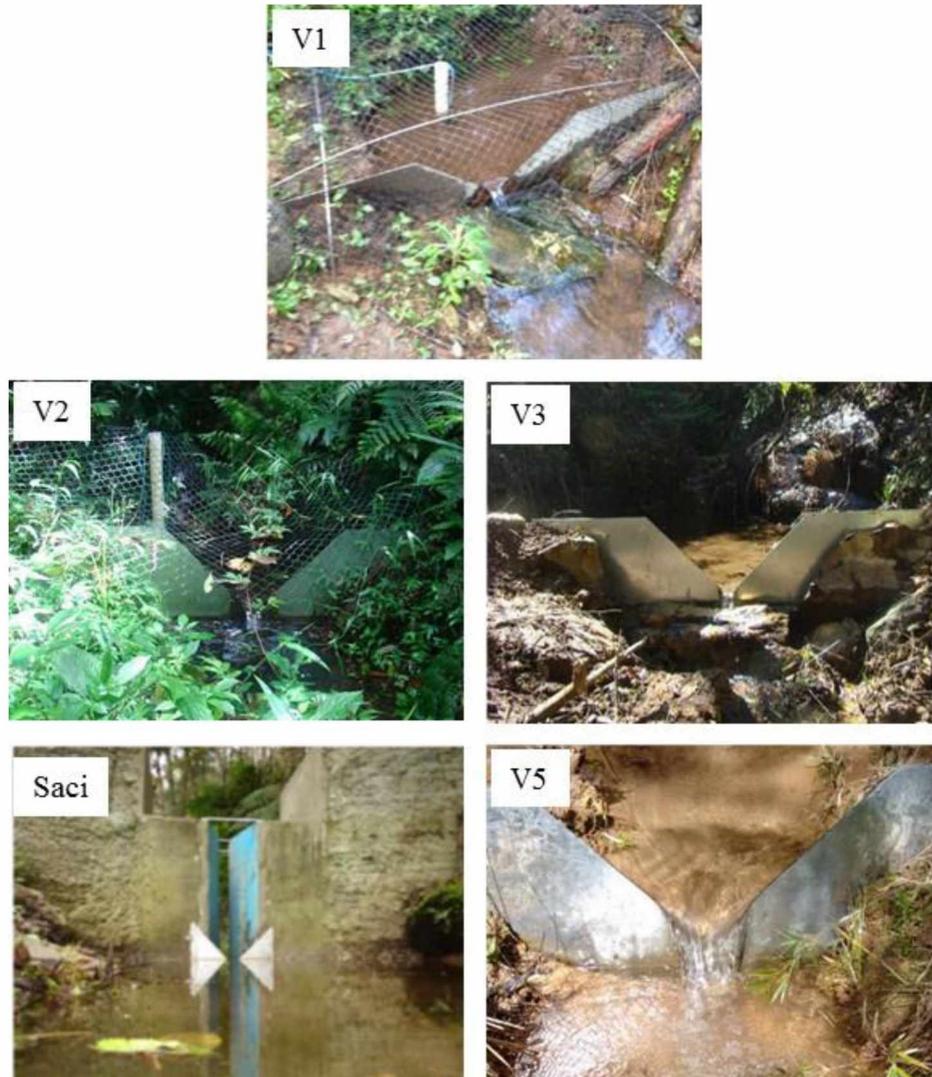
FONTE: O autor (2017)

O monitoramento das cotas em todas as estações foi realizado com sensores de diferenças de pressão. Esses sensores foram ligados em sistemas de *datalogger* para possibilitar a aquisição automática de dados com intervalo de 10 minutos. Para verificar a consistência das leituras automáticas foram realizadas leituras de régua instalada no vertedor (FIGURA 13b).

Nas estações Saci e V5 foi realizado o monitoramento de concentração de sedimentos em suspensão por meio do registro da turbidez. Nessas estações foram instalados turbidímetros da marca FTS modelo DTS-12 a aproximadamente um metro à montante das estruturas de medição de vazão. Esse modelo de turbidímetro possui um sistema mecânico de limpeza da

superfície de emissão e recepção do sinal que, na operação em campo, impede a deposição de material ou desenvolvimento de biofilme que alterariam os valores de turbidez medidos.

FIGURA 12 – ESTRUTURAS UTILIZADAS PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO.

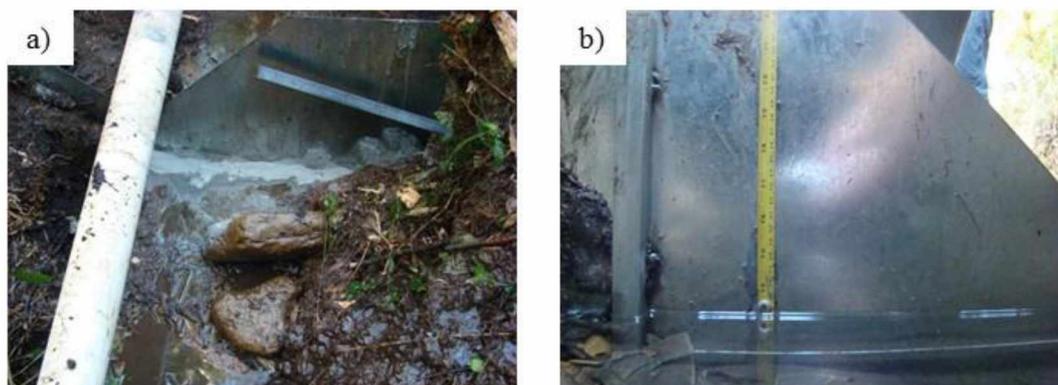


FONTE: O autor (2017)

Para conhecer o transporte de sedimentos a partir do monitoramento da turbidez é necessário estabelecer a relação entre essa variável e a concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}). Essa relação é dependente de características do material transportado, tais como granulometria e teor de matéria orgânica, que são diferentes em cada local de monitoramento e podem variar no tempo (MINELLA, et al., 2008; LANDERS; STURM, 2013). Tendo em vista a necessidade de estabelecer curvas de calibração para cada estação e a

dificuldade de coletar amostras de sedimentos durante eventos de cheia em pequenas bacias, a relação entre turbidez e concentração de sedimentos em suspensão foi estabelecida em laboratório. O procedimento de calibração consistiu na leitura da turbidez de amostras preparadas com sedimentos transportados em suspensão coletados nas estações de monitoramento.

FIGURA 13 – INSTALAÇÃO DE VERTEDOR.



FONTE: O autor (2017)

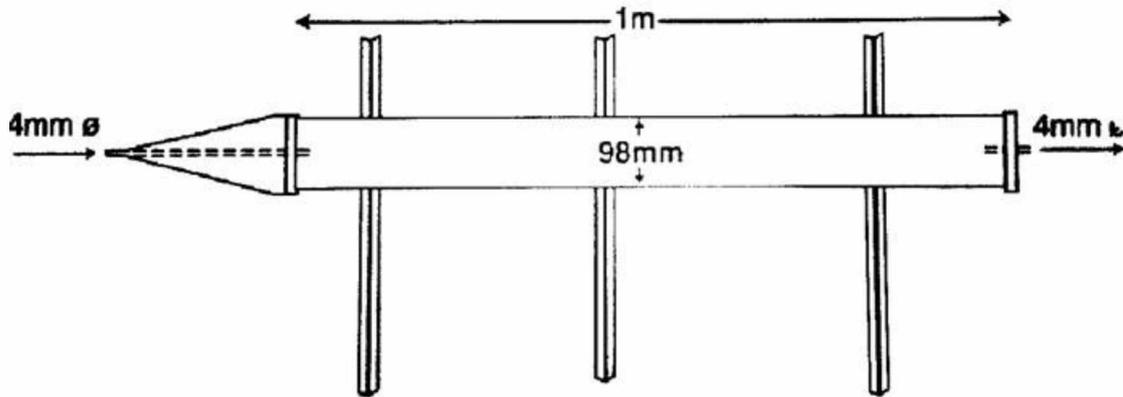
LEGENDA: a) Processo de instalação utilizando cimento para fixação. b) Régua para medição de nível.

Em cada um dos pontos de monitoramento foram instalados amostradores integradores no tempo (FIGURA 14 e FIGURA 15) com o objetivo de coletar continuamente uma fração dos sedimentos em suspensão transportados pelo escoamento. Esse tipo de amostrador acumula o material referente ao período de amostragem sendo que a amostra representa um comportamento médio. As amostras de sedimentos em suspensão utilizadas na calibração dos turbidímetros das estações Saci e V5 foram coletados nos amostradores por um período de aproximadamente um mês (26/11/2016 a 23/12/2016).

As amostras de sedimentos foram secas a 65 °C e peneiradas em malha de 2 mm. Foram preparadas misturas de água e sedimentos com concentrações entre 2 e 4000 mg L⁻¹ adicionando os sedimentos em um Becker contendo 1 L de água deionizada (FIGURA 16). O turbidímetro foi então inserido enquanto os sedimentos foram mantidos em suspensão por meio da utilização de agitador magnético. O uso da agitação durante a mensuração da turbidez é recomendado no procedimento de calibração por estudos que utilizaram procedimentos de calibração semelhantes (CLIFFORD et al., 1995; LEWIS, 1996; ORWIN; SMART, 2005). Dessa forma,

garante-se que a massa de sedimentos adicionada não seja decantada produzindo gradiente de concentração dentro do recipiente.

FIGURA 14 – AMOSTRADOR DO TIPO INTEGRADOR NO TEMPO



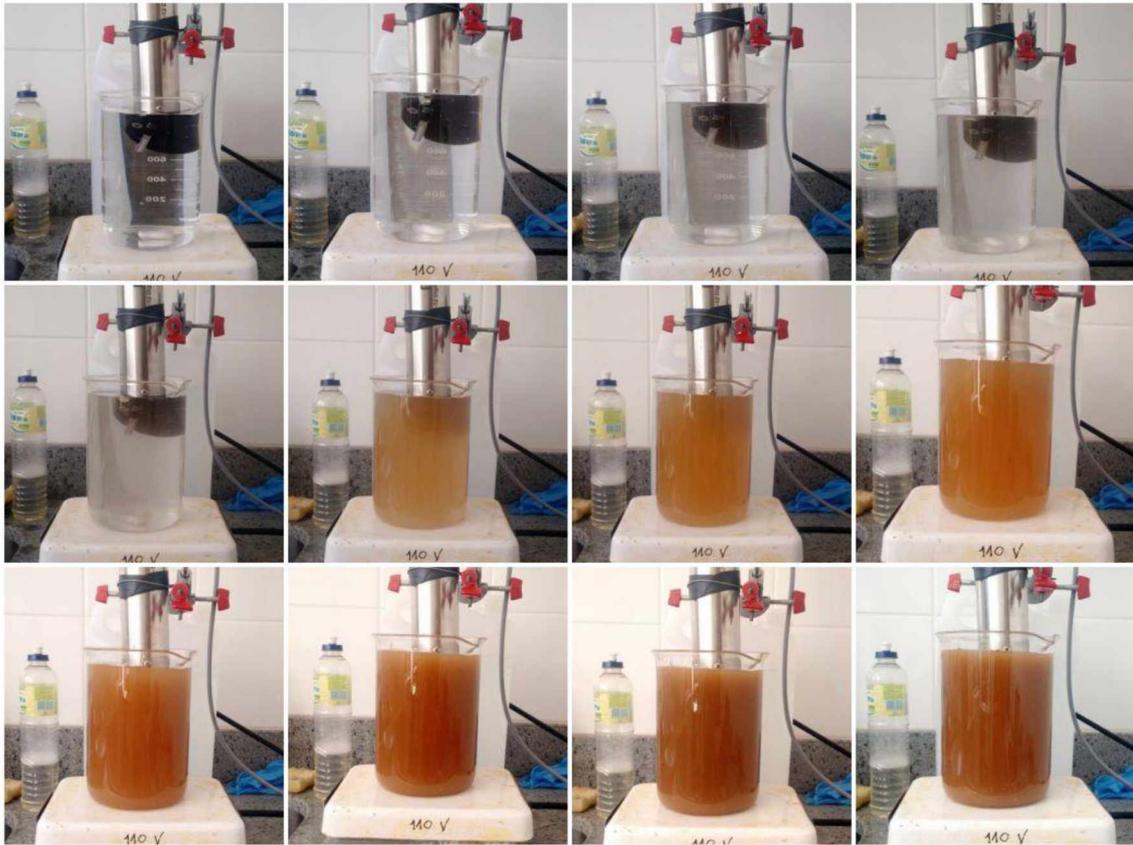
FONTE: Poletto e Merten (2006).

FIGURA 15 – AMOSTRADOR TIPO INTEGRADOR NO TEMPO INSTALADO NA ESTAÇÃO SACI



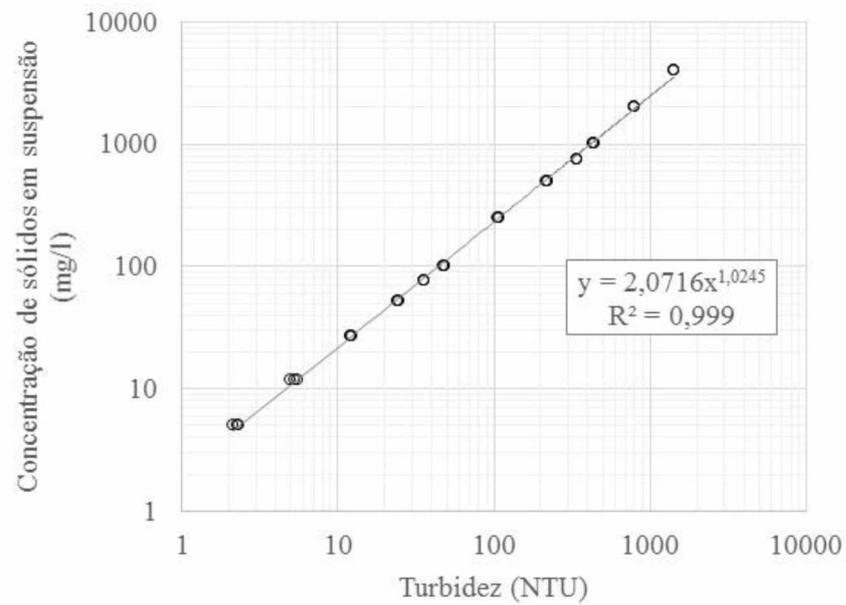
FONTE: O autor (2017)

FIGURA 16 – LEITURAS DE TURBIDEZ EM LABORATÓRIO PARA DEFINIÇÃO DE CURVA TURBIDEZ X CSS



FONTE: O autor (2017)

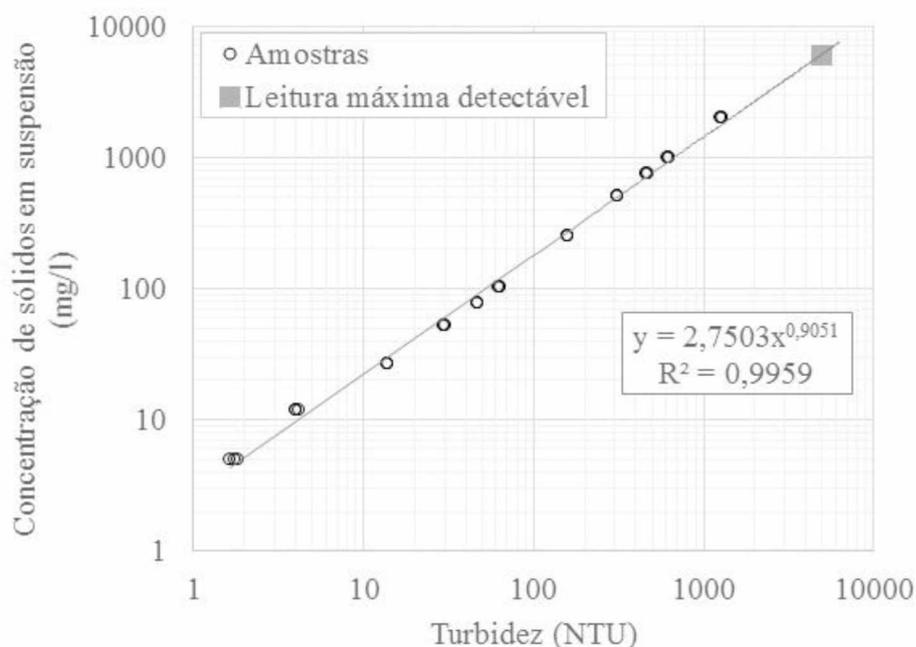
FIGURA 17 - CURVA TURBIDEZ X CSS DEFINIDA PARA A ESTAÇÃO SACI



FONTE: O autor (2017)

As curvas de calibração dos turbidímetros para as estações Saci e V5 são apresentadas na FIGURA 17 e FIGURA 18. Tendo em vista que em observações de campo foi verificado maior potencial de transporte na estação V5, foi realizada calibração até atingir a leitura máxima do turbidímetro. A partir da concentração de 6020 mg L⁻¹, com turbidez igual a 4903 NTU, não ocorre variação na resposta do turbidímetro com o aumento da concentração de sedimentos em suspensão.

FIGURA 18 - CURVA TURBIDEZ X CSS DEFINIDA PARA A ESTAÇÃO V5



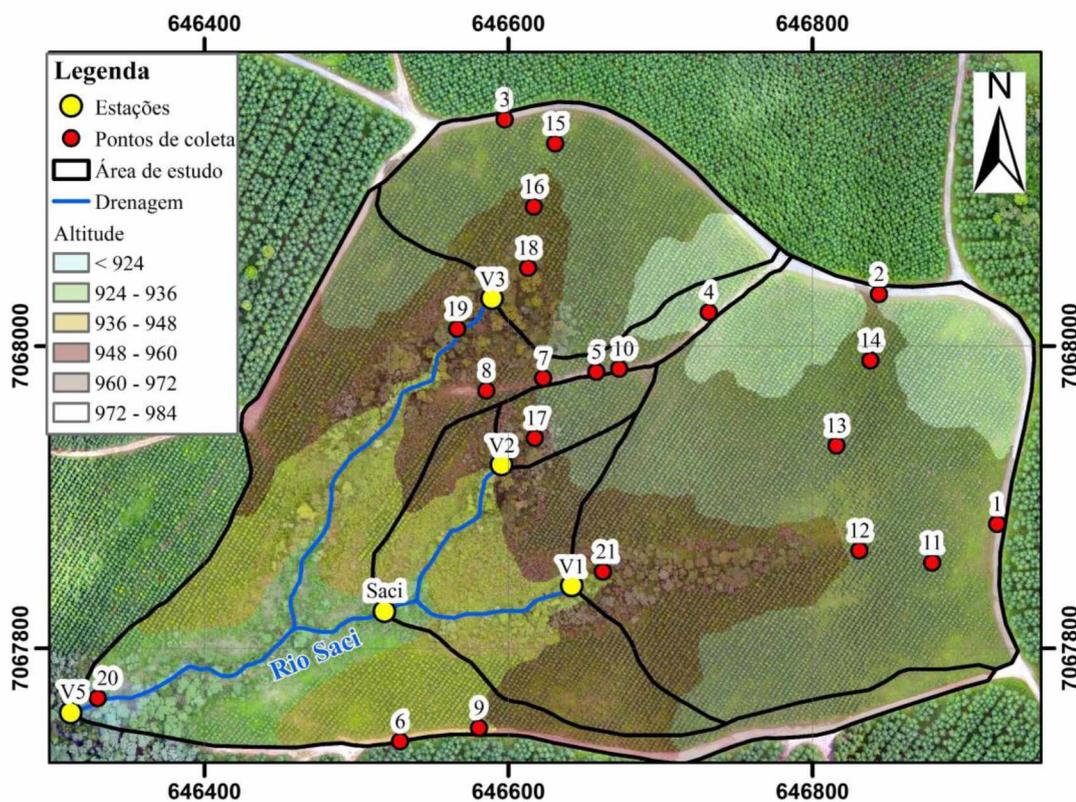
FONTE: O autor (2017)

4.3. ANÁLISE QUÍMICA ELEMENTAR E GRANULOMÉTRICA DE ÁREAS FONTE E DE SEDIMENTOS TRANSPORTADOS

As amostras utilizadas nas análises foram coletadas com o objetivo de caracterizar as diferentes fontes de sedimentos dentro da bacia hidrográfica e os sedimentos transportados. A localização dos pontos de coleta é apresentada na FIGURA 19. Nos pontos identificados pela numeração de 1 a 21 a amostragem foi realizada coletando 5 sub amostras, sendo uma central e outras quatro em um raio de 5 m, todas na profundidade de 0 a 5 cm.

Além das amostras da superfície do solo em encostas com plantio de *Pinus Taeda*, Zona riparia com floresta nativa, e estradas foram identificadas ravinas das quais foram também retiradas amostras. Nos canais das 5 estações de monitoramento foram coletadas, no dia 12/10/2016, amostras do material de fundo depositado a montante dos vertedores. Utilizando o amostrador de sedimentos integrador no tempo (FIGURA 14) foram coletados sedimentos transportados nas cinco estações de monitoramento durante três períodos (TABELA 5).

FIGURA 19 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE COLETA DE AMOSTRAS DE SOLOS E SEDIMENTOS



FONTE: O autor (2017)

TABELA 5 – SEDIMENTOS ACUMULADOS NOS AMOSTRADORES EM CADA PERÍODO

Bacia	Sedimentos acumulados no amostrador (g)		
	Período 1 (12/10/2016 a 26/11/2016)	Período 2 (26/11/2016 a 23/12/2016)	Período 3 (23/12/2016 a 31/01/2017)
V1	1,61	0,96	0,23
V2	1,49	0,28	0,60
V3	1,45	0,28	0,08
Saci	7,67	16,58	19,36
V5	166,93	39,82	41,81

FONTE: O autor (2017)

Todas as amostras, incluindo aquelas coletadas pelos amostradores integradores no tempo, passaram por preparo inicial de secagem em estufa a 40 °C por 48 h e peneiramento para obter material com tamanho inferior a 2 mm. Posteriormente, foram realizadas análises granulométricas, determinação do teor de carbono orgânico e análise química elementar (Si, Al, Fe, K, Ti, Mg, Na, Ca, S, P, Cl, Cu, Mn).

A determinação da distribuição granulométrica das amostras foi realizada no Laboratório de Análises de Minerais e Rochas (LAMIR/UFPR) por meio do granulômetro a laser *Microtrac S3500*. A dispersão das amostras foi realizada com a aplicação de ultrassom acoplado ao equipamento.

A análise de teor de carbono orgânico foi realizada no Laboratório de Engenharia Ambiental (LABEAM/UFPR). O preparo inicial consistiu na eliminação do carbono inorgânico realizada pela aplicação de 10 ml de HCl 1 mol L⁻¹ em 2g da amostra seguido por aquecimento em chapa a 180 °C até a evaporação completa da fase líquida. A determinação do carbono orgânico total (COT) foi então realizada pelo método de combustão seca, inserindo 0,2 g da amostra em analisador *TOC-VCPH (SHIMADZU)* no qual ocorre a combustão da amostra a 1000 °C que resulta na liberação de CO₂ que é então quantificado por sensor infravermelho não dispersivo (LABEAM, 2015).

Visando a aquisição de mais características que possibilitassem estabelecer a relação entre os sedimentos transportados e os locais de erosão e transporte foi realizada a análise química elementar das amostras. A análise foi realizada no Centro de Microscopia Eletrônica (CME/UFPR) utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) TESCAN VEGA3 LMU equipado com sistema de análise química por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS). As amostras, secas e peneiradas, foram aderidas, utilizando fita de carbono dupla-face, sobre suporte de alumínio, recobrando uma área 1 cm² sobre a qual foi realizada a detecção da concentração relativa dos elementos químicos presentes nas amostras. Para os sedimentos transportados, essa análise foi realizada apenas para o período 1 e 2.

4.3.1. Análise estatística

Para analisar a relação entre as amostras, utilizando as concentrações dos elementos identificados, foi aplicada a análise de componentes principais, seguida por agrupamento hierárquico utilizando as componentes que melhor explicam a variação do conjunto das

amostras (HUSSON et al., 2010). As análises foram realizadas utilizando o pacote *FactoMineR* (LÊ et al., 2008) disponível na Linguagem *R* (R Core Team, 2013). Após a seleção dos componentes principais, o agrupamento hierárquico foi realizado com base na medida de distância euclidiana e o critério aglomeração de Ward.

4.4. ANÁLISE DE EVENTOS HIDROSSSEDIMENTOLÓGICOS

A série de dados utilizada para a análise de eventos compreendeu o período de 25/11/2016 a 03/02/2017. A curta extensão da série utilizada para a análise dos eventos se deve a problemas no monitoramento de turbidez que causaram períodos longos de falhas. A seleção do período considerou a porção da série de dados na qual os sensores de turbidez das estações Saci e V5 estavam operando simultaneamente para permitir a comparação entre as estações.

A série monitorada foi dividida em eventos individuais utilizando como critério a ocorrência de chuvas que fossem separadas por períodos de seis horas com menos de 2 mm. Foram analisados apenas os eventos em que houvesse aumento de vazão na estação V5. Para o período monitorado foram identificados 26 eventos.

Para cada evento foi realizada a separação do escoamento superficial. Essa separação foi feita pela identificação no hidrograma dos momentos de início e fim do escoamento superficial, ligando-os por uma linha reta. O ponto inicial de contribuição do escoamento superficial foi identificado pelo início da ascensão da vazão e o ponto final pela mudança na inclinação da recessão. O ponto de inflexão da recessão foi identificado visualmente plotando o hidrograma em escala logarítmica (TUCCI, 2004).

A conectividade do escoamento superficial de cada evento foi definida pela comparação entre a área de contribuição do escoamento do evento e o tamanho das áreas mais propensas à geração de escoamento superficial. Para a definição da área de contribuição (A_c), foi utilizada a equação proposta por Dickinson e Whiteley (1970):

$$A_c = \frac{1000 \times V_o}{P} \quad (1)$$

em que: A_c é a área de contribuição do escoamento superficial (m^2); V_o é o volume do escoamento superficial do evento (m^3); e P é a precipitação total do evento (mm).

Para a definição das áreas propensas à geração de escoamento superficial foram consideradas verificações em campo, além de trabalhos anteriormente realizados dentro da área de estudo e demais bacias florestadas com condições similares. Nesse sentido, foram consideradas como as principais fontes de escoamento superficial as áreas saturadas e as estradas não pavimentadas.

As áreas saturadas ocorrem em locais de convergência topográfica e de pouca declividade onde é favorecida a presença do nível freático próximo à superfície (HORNBERGER et al., 1998). Essas condições ocorrem predominantemente no entorno dos canais de drenagem. As áreas saturadas têm como característica a variação em seu tamanho, sendo que a expansão e contração das mesmas são condicionadas por fatores como a topografia, tipo de solo, umidade antecedente e características da chuva (DUNNE; BLACK, 1970). Na área de estudo foi verificado por Santos (2009), para a área de drenagem da estação Saci, que as fontes de escoamento superficial mais frequentemente conectada são as áreas saturadas localizadas na zona ripária, no entorno dos canais perenes, e que essas áreas têm seu tamanho máximo de expansão limitado pelo tamanho do fundo do vale encaixado da bacia. Dessa forma, a expansão máxima da área saturada é condicionada pelo relevo e a definição do seu tamanho para cada sub bacia monitorada foi realizada por meio da interpretação do relevo, usando o modelo digital do terreno, delimitando as áreas de baixa declividade no entorno dos canais.

No estudo de Santos (2009) foi verificada a contribuição de escoamento de área saturada secundária que se desenvolve ao longo do talvegue e se conecta aos canais de drenagem em eventos com precipitação entre 25 e 50 mm que tenham alta umidade antecedente na bacia e em eventos com precipitação superior a 50 mm independente da umidade inicial. Nesses casos, a conectividade da área saturada secundária provoca um aumento da proporção de precipitação convertido em escoamento.

Nos eventos em que a área de contribuição de escoamento superficial (Equação 1) foi inferior ou igual ao tamanho das áreas saturadas foi assumido que o escoamento foi proveniente apenas dessas áreas. Nos eventos em que a área de contribuição de escoamento superficial superou a área saturada a conexão de escoamento superficial gerado em estradas ou outras áreas dentro da bacia foi avaliada. Os dados de precipitação e escoamento superficial observados nos eventos do presente estudo foram comparados com os eventos observados por Santos (2009)

dentro da área de drenagem da estação Saci para verificar a ocorrência de contribuição de áreas saturadas secundárias, não localizadas no entorno dos canais de drenagem.

Para cada evento o transporte de sedimentos foi caracterizado pelo total de sedimentos transportados e pela forma de histerese entre vazão e concentração de sedimentos em suspensão. Para o cálculo da produção total de sedimentos nos eventos foi considerado o transporte que ocorre entre o início da precipitação e o fim do escoamento superficial. Os eventos foram caracterizados pela forma da histerese, sendo identificados os laços horário (H) e anti-horário (AH), além de eventos sem histerese (L). A ocorrência e tipo de laço de histerese, juntamente com o tamanho da área de contribuição de escoamento, foram utilizados na interpretação da conectividade do transporte de sedimentos entre as áreas de disponibilização de sedimentos e os rios.

4.5. APLICAÇÃO DO MODELO LISEM

Os processos considerados pelo modelo LISEM são: precipitação, interceptação, armazenamento superficial em micro depressões, infiltração, movimento vertical da água no solo, escoamento superficial, escoamento em canal, erosão por salpicamento, erosão pelo escoamento superficial e a capacidade de transporte do escoamento (DE ROO et al., 1996). A versão do modelo utilizada foi a openLISEM 3.96. A descrição do modelo, apresentada a seguir, foi feita de acordo com Jetten (2002).

A interceptação da precipitação pela vegetação é calculada de acordo com Aston (1979):

$$S = C_p S_{\max} \left[1 - e^{-k \left(\frac{P_{\text{acum}}}{S_{\max}} \right)} \right] \quad (2)$$

em que: S é a interceptação acumulada (mm); S_{\max} é a capacidade de armazenamento da copa (mm); C_p é a fração de cobertura da vegetação; P_{acum} é a precipitação acumulada (mm) e k é um fator de correção.

O cálculo do armazenamento máximo em micro depressões (mm) é feito pela relação entre a rugosidade da superfície (RR) (mm), definida como o desvio padrão das alturas da superfície, e a declividade, conforme a equação definida por Kamphorst et al. (2000):

$$MDS = 0,243 RR + 0,01 RR^2 + 0,012 RR S \quad (3)$$

em que S é a declividade (%).

O modelo permite mais uma possibilidade de abordagem do processo de infiltração. Os modelos de infiltração disponíveis no LISEM são: Holtan, Green e Ampt e o modelo SWATRE. Nesse trabalho foi utilizado o modelo Green e Ampt por permitir a representação da infiltração com dados disponíveis para a área de estudo, sendo definido por:

$$i = -Ks \left(\frac{\Psi_m(\theta_s - \theta_i)}{I} + 1 \right) \quad (4)$$

em que: i é a taxa de infiltração ($m s^{-1}$); Ks é a condutividade hidráulica saturada; Ψ_m é a tensão matricial (m); θ_s é a porosidade total ($m m^{-1}$), θ_i umidade inicial ($m m^{-1}$) e I é a infiltração acumulada (m).

O cálculo do escoamento é feito utilizando a equação de Manning, considerando a área da seção:

$$Q = \frac{A_{sec}}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (5)$$

em que: Q é a vazão ($m^3 s^{-1}$); A_{sec} é a área da seção (m^2); n é o coeficiente de Manning ($m^{1/3} s^{-1}$); R_h é o raio hidráulico (m); S é a declividade ($m m^{-1}$).

A simulação do transporte dos sedimentos é baseada no balanço entre a desagregação pela erosão e a deposição. Sendo assim, o transporte de sedimentos é dado por:

$$e = Ds + Df - Dp \quad (6)$$

em que: e é o transporte de sedimentos ($g s^{-1}$); Ds é a erosão por salpicamento ($g s^{-1}$); Df é a erosão pelo escoamento ($g s^{-1}$); Dp é a deposição de sedimentos ($g s^{-1}$).

A erosão por salpicamento é calculada em função da estabilidade de agregados, energia cinética da chuva e altura do escoamento na superfície (JETTEN, 2002):

$$Ds = \left(\frac{2,28}{As \cdot Ke \cdot \exp(-1,48h_w) + 2,96} \cdot P \cdot A \right) \quad (7)$$

em que: As é a estabilidade de agregados (adimensional); Ke é a energia cinética ($J m^{-2}$); h_w é a altura da lâmina de água na superfície (mm); P é a precipitação (mm); A é a área sobre a qual ocorre o impacto da chuva (m^2)

A capacidade do escoamento de erodir e transportar os sedimentos utiliza a equação empregada por Morgan et al. (1998):

$$D = Y(Tc - C) \cdot Vs \cdot w \cdot dx \quad (8)$$

em que: D é Df ou Dp ($kg s^{-1}$); Tc é a capacidade de transporte ($kg m^{-3}$); C é a concentração de sedimentos ($kg m^{-3}$); Vs é a velocidade de queda das partículas ($m s^{-1}$); w é a largura do escoamento (m); dx é a comprimento da célula (m); Y é um fator de eficiência. O fator Y expressa a relação entre a velocidade crítica de cisalhamento e a coesão do solo (RAUWS; GOVERS, 1988):

$$Y = \frac{u_{min}}{uc} = \frac{1}{(0,89 + 0,56 \cdot Coh)} \quad (9)$$

em que: uc é a velocidade crítica de cisalhamento ($cm s^{-1}$); u_{min} é o valor mínimo para a velocidade de cisalhamento crítica ($cm s^{-1}$); Coh é a coesão do solo úmido (kPa). A capacidade de transporte do escoamento é considerada com base na potência do escoamento (MORGAN et al., 1998; GOVERS, 1990), pela equação:

$$Tc = \rho s c (\omega - \omega_c)^d \quad (10)$$

em que: Tc é a capacidade de transporte (kg m^{-3}), ρ_s é a massa específica das partículas (2650 kg m^{-3}), ω é a potência do escoamento (m s^{-1}), ω_c é a potência crítica do escoamento (m s^{-1}), c e d são coeficientes experimentais que dependem do diâmetro mediano das partículas (D_{50}) (Equações 12 e 13). Considerando que ω é dado por VS e que, de acordo com Govers (1990), ω_c pode ser assumido $0,004 \text{ m.s}^{-1}$, a equação utilizada no cálculo de Tc por Jetten (2002) é:

$$Tc = 2650 c (VS - 0,004)^d \quad (11)$$

V é a velocidade do escoamento (m s^{-1}) e S é a declividade (m m^{-1}). Os parâmetros c e d dependem da granulometria dos sedimentos e, com base no trabalho de Govers (1990), foi estabelecida por Morgan et al. (1998), como:

$$c = \left[\frac{(D_{50} + 5)}{0,32} \right]^{-0,6} \quad (12)$$

$$d = \left[\frac{(D_{50} + 5)}{300} \right]^{0,25} \quad (13)$$

em que D_{50} é o diâmetro mediano dos sedimentos (μm).

4.5.1. Dados de entrada do modelo LISEM

Os dados de entrada do modelo LISEM são informados de forma distribuída no espaço. Os parâmetros de entrada são indicados utilizando arquivos em formato *raster* utilizando o software *PCRaster* (KARSSENBERG et al., 2010) e são divididos em valores descritivos da forma, infiltração, rugosidade superficial e erosão. A distribuição espacial desses parâmetros foi definida pela topografia, classes de solo e uso da terra (FIGURA 20). Os parâmetros associados aos solos foram informados no modelo de acordo com a distribuição espacial de seis classes de profundidade de solos, definidas por Santos (2009), e uma classe exclusiva para as estradas.

As informações sobre forma da bacia são: modelo digital de elevação, declividade e direção de fluxo. O modelo digital do terreno (MDT) em escala 1:5.000 e resolução espacial de 1m, obtido por Hung et al. (2017, submetido à publicação), foi convertido para o formato *PCRaster* e utilizando este *software* foram gerados os mapas de declividade e direção de fluxo.

Como foi observado em campo e destacado na descrição do uso e cobertura da terra (FIGURA 10) as estradas presentes na área de estudo direcionam o escoamento, gerado em sua superfície e interceptado de áreas adjacentes que drenam em direção às estradas, para seis pontos nos quais é transferido para encostas onde percorrem o caminho em direção dos canais de drenagem. Dessa forma, o escoamento e sedimentos das estradas são concentrados nesses seis locais e a sua conexão com os canais de drenagem estão condicionados a sua capacidade de transpor a extensão da encosta. A implementação incorreta dessa configuração espacial no modelo tem como consequência a mudança no componente estrutural da conectividade por modificar os locais de transferência de escoamento e sedimentos e a partir dessa mudança alterar a extensão e declividade do caminho do escoamento. A má representação da direção de fluxo pode ainda levar à simulação de processos de infiltração, geração de escoamento, erosão e deposição, com distribuição espacial e valores totais diferentes do observado na área de estudo por representar um caminho de escoamento que passa por condições de infiltração e coesão do solo diferentes do observado na realidade.

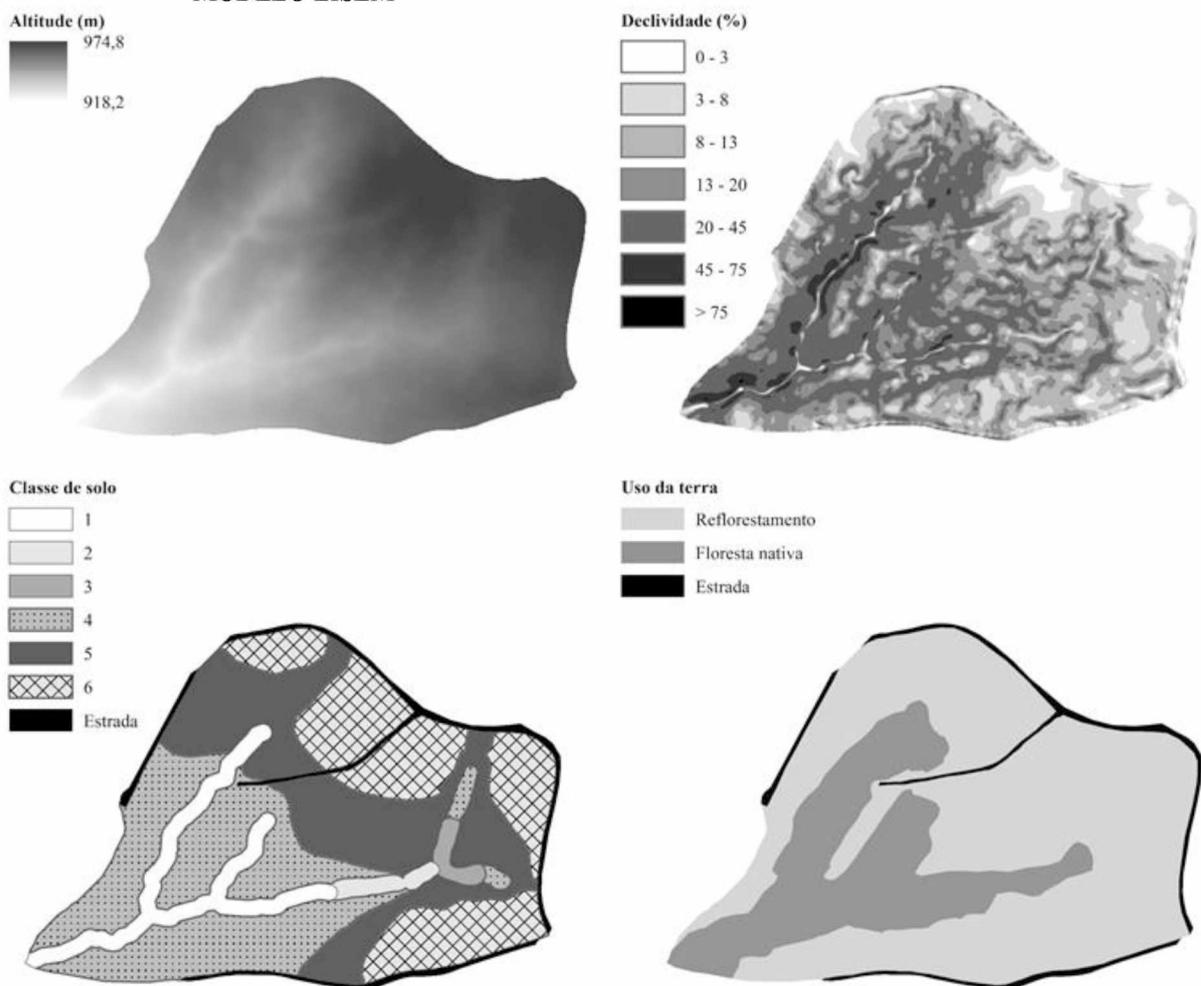
Avaliando a influência das estradas em simulações com o modelo LISEM Hölzel e Diekkrüger (2012) verificaram que a incorporação das estradas nas simulações possibilita a identificação de áreas de maior ocorrência de processos de erosão e deposição de sedimentos além resultar no aumento da geração de escoamento e erosão na escala da bacia. Mesmo em casos em que não é observada mudança expressiva nos valores totais de geração de escoamento, infiltração, erosão e deposição de sedimentos, de acordo com Takken et al. (2005) diferentes configurações espaciais do direcionamento de fluxo apresentam efeito importante na identificação de áreas críticas de ocorrência desses processos que afetam a interpretação da conectividade entre áreas.

Tendo em vista as modificações do direcionamento de fluxo causadas pelas estradas presentes na área de estudo, o modelo digital do terreno passou por uma verificação visual com objetivo de garantir a correta representação da forma da estrada e do direcionamento de fluxo. Essa verificação foi realizada com auxílio de fotos aéreas (HUNG et al., 2017, submetido à publicação) e do reconhecimento em campo. No caso da identificação de inconsistência na direção de fluxo foram localizadas as células inconsistentes e realizada alteração manual do

valor de altitude seguido da reavaliação do direcionamento de fluxo. Dessa forma, o MDT empregado no modelo, após a verificação, possui a correta representação da forma das estradas e tem saída de escoamento consistente com o observado em campo.

Os parâmetros de infiltração e erosão foram atribuídos à distribuição de classes de profundidade de solos e estradas (TABELA 6). O mapa com distribuição espacial da profundidade do solo (Z) foi elaborado a partir do levantamento realizado na área de estudo por Santos (2009).

FIGURA 20 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL UTILIZADA PARA ATRIBUIR OS PARÂMETROS DO MODELO LISEM



FONTE: O autor (2017)

A condutividade hidráulica (K_s) dos solos foi medida por Santos (2009). A porosidade foi adotada de acordo com a distribuição proposta por Marangon e Santos (2012). A condutividade hidráulica e a porosidade para as estradas foram obtidas em Schultz (2013) que

determinou esses parâmetros em segmentos de estrada localizados em uma bacia hidrográfica adjacente a área de estudo. Por haver uma importante contribuição de escoamento proveniente da área saturada no entorno dos canais de drenagem essa área foi informada no modelo, de acordo com o tamanho e forma definido na análise dos eventos, como um perfil de solo totalmente saturado.

O potencial matricial na frente de molhamento (Ψ_m) foi calculado utilizando a equação de pedotransferência proposta por Raws et al. (1983):

$$\Psi_m = \text{Exp} \left(\begin{array}{l} 6,5309 - 7,3256 \theta_s + 0,0011583 \text{Arg}^2 + 3,809479 \theta_s^2 + \\ 0,0003444 \text{Are} \text{Arg} - 0,049837 \text{Are} \theta_s + 0,001608 \text{Are}^2 \theta_s^2 - \\ 0,000014 \text{Are}^2 \text{Arg} - 0,00348 \text{Arg}^2 \theta_s - 0,0008 \text{Are}^2 \theta_s \end{array} \right) \quad (14)$$

em que: θ_s é a porosidade total (m m^{-1}); Arg é o teor de argila (%); Are é o teor de areia (%).

A estabilidade de agregados (As) foi adotada de acordo com os valores utilizados por Kværnø e Stolte (2012). O parâmetro de coesão do solo (Coh) foi obtida em campo utilizando um Torvane, sendo adotado o valor de Coh médio de três medições realizadas em cada uso da terra.

TABELA 6 – PARÂMETROS DE INFILTRAÇÃO E EROÇÃO ASSOCIADOS ÀS CLASSES DE SOLOS

Classe	Infiltração				Erosão		
	z^1 (mm)	Ks^2 (mm h ⁻¹)	θ_s^3 (m ⁻¹)	(m Ψ^4 (cm)	Coh^5 (kPa)	As^6	D_{50}^7 (μm)
1	500	141	0,55	2,67	37	66	50
2	2000	40	0,50	2,67	37	66	44
3	3000	70	0,45	2,67	37	66	44
4	4000	40	0,45	2,67	37	66	44
5	5000	70	0,45	2,67	37	66	44
6	7000	70	0,45	2,67	37	66	44
Estradas	-	5	0,37	10,18	103	200	38

Nota: ¹Profundidade do solo de Santos (2009). ² Condutividade hidráulica de Schultz (2013) para estrada e de Santos (2009) para as demais classes. ³ Porosidade total de Schultz (2013) para estrada e de Marangon e Santos (2012) para as demais classes. ⁴ Potencial matricial na frente de molhamento calculado pela equação de Raws et al. (1983). ⁵ Coesão do solo úmido (kPa) medido em campo. ⁶ Estabilidade de agregados de Kværnø e Stolte (2012). ⁷ Diâmetro mediano dos sedimentos medido.

Os parâmetros de rugosidade da superfície (RR), coeficiente de rugosidade de Manning (n) e capacidade de armazenamento da copa ($Smax$), foram associados a distribuição dos usos da terra (TABELA 1). Os valores de rugosidade (RR) e coeficiente de Manning (n) foram obtidos em Takken et al. (1999). Para a interceptação máxima pela vegetação ($Smax$) foram adotados os valores medidos por Santos (2009) para as áreas de plantio de *Pinus* e por Giglio (2013) para a floresta nativa.

TABELA 7 – PARÂMETROS ASSOCIADOS À DISTRIBUIÇÃO DO USO DA TERRA

Classe	RR^1 (mm)	n^2 (s m ^{-1/3})	$smax^3$ (mm)
Reflorestamento	1,36	0,3	3,4
Floresta nativa	1,36	0,3	5
Estrada	0,01	0,023	0

NOTA: ¹ Rugosidade da superfície de Takken et al. (1999). ² Coeficiente de Manning de Takken et al. (1999). ³ Capacidade de armazenamento da copa de Santos (2009) para as áreas de plantio de *Pinus* e de Giglio (2013) para a floresta nativa.

4.5.2. Calibração do modelo LISEM

A calibração foi realizada de forma manual e a avaliação da qualidade das simulações foi feita comparando os hidrogramas e os sedimentogramas observados e simulados por meio de inspeção visual e utilizando o coeficiente de eficiência (COE) proposto por Nash e Sutcliffe (1970):

$$COE = 1 - \frac{\sum(E_{sim} - E_{obs})^2}{\sum(E_{obs} - \bar{E}_{obs})^2} \quad (15)$$

em que: E_{sim} é o valor simulado, E_{obs} é o valor observado, e \bar{E}_{obs} é a média dos valores observados. O COE pode variar de $-\infty$ a 1, sendo $COE = 1$ indicativo de ajuste perfeito. Valores de $COE > 0,5$ são considerados satisfatórios (MORIASI et al., 2007).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. COMPORTAMENTO HIDROSEDIMENTOLÓGICO NO PERÍODO DE MONITORAMENTO

4.1.1. Características gerais de vazão e transporte de sedimentos

A permanência das vazões nos cinco pontos de monitoramento é apresentada na FIGURA 21. As curvas de permanência da vazão das estações V5, Saci e V2 apresentam forma similar, com vazões proporcionais às áreas de drenagem. A estação V2 apresenta vazões medianas (Q_{50}) de $0,45 \text{ L s}^{-1}$, sendo aproximadamente o dobro da observada nas nascentes V1 e V3. Assim, na nascente V2, a área de contribuição de escoamento de base possui maior capacidade de manter as vazões durante períodos de recessão. O mesmo não ocorre para as vazões altas em que a vazão Q_{10} da nascente V2 é de $0,75$, sendo próxima da observada na nascente V1 ($0,88 \text{ L s}^{-1}$) que possui a maior área entre as nascentes. A nascente V1 apresentou a particularidade de, apesar de possuir maior área de drenagem, ter as menores vazões mínimas e vazões altas com valores próximos aos observados na nascente V3.

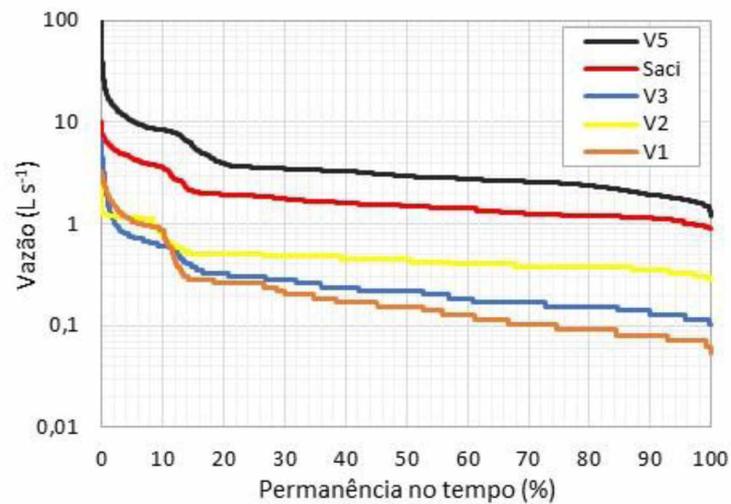
As distribuições de sedimentos, representadas pelas curvas de permanência das descargas sólidas das estações Saci e V5 (FIGURA 22), mostram as diferenças acentuadas entre as duas estações. Na estação V5 na maior parte do tempo a descarga sólida possui valores entre $0,18 \text{ g s}^{-1}$, na permanência de 10 % e $0,02 \text{ g s}^{-1}$, na permanência de 90 %, apresentando aumento considerável para os valores máximos de descarga sólida, chegando até a 226 g s^{-1} .

Na bacia Saci, a descarga sólida apresenta valores muito inferiores e forma diferente da observada na bacia V5. Para as permanências maiores observa-se a tendência de redução acentuada da descarga sólida, que se aproxima de zero na permanência de 83 %, em que, na série monitorada, a turbidez apresenta valor igual a 0 NTU.

Os valores de escoamento e produção de sedimentos para os períodos considerados são apresentados na TABELA 8. Para as nascentes o escoamento reflete o que foi observado na curva de permanência, sendo que, as nascentes V1 e V3 apresentam escoamento com valores próximos, média de 1042 e 1025 m^3 respectivamente, enquanto a nascente V2 tem escoamento de 1816 m^3 devido às maiores vazões para permanência superior a 10 %. O escoamento médio dos períodos observado na bacia Saci foi de 6472 m^3 enquanto na bacia V5 foi de 13788 m^3 ,

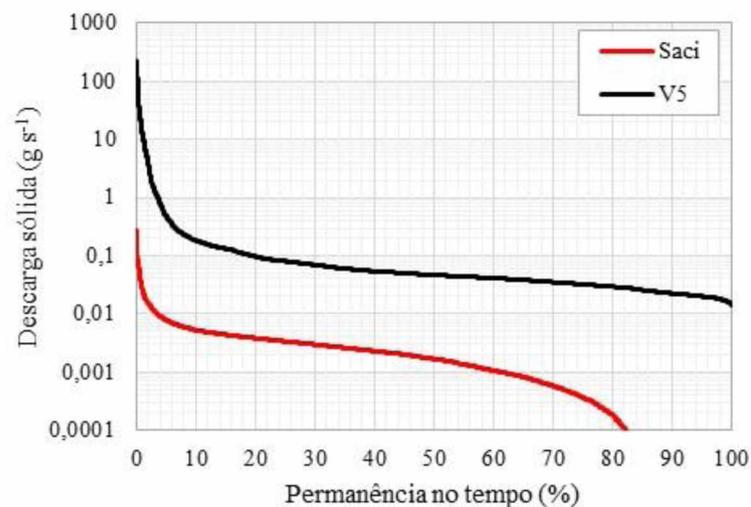
sendo 2,13 vezes maior. Considerando que a área de drenagem da bacia V5 é 1,95 vezes superior à da bacia Saci, o aumento do escoamento médio dos períodos é proporcional ao aumento da área.

FIGURA 21 – CURVA DE PERMANÊNCIA DA VAZÃO NAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO



FONTE: O autor (2017)

FIGURA 22 - CURVA DE PERMANÊNCIA DA DESCARGA SÓLIDA NAS ESTAÇÕES SACI E V5



FONTE: O autor (2017)

A mesma relação, com aumento proporcional à área, não ocorre para produção de sedimentos. Ao comparar a produção média de sedimentos da bacia V5 e Saci é observado que, com o aumento da área de drenagem, ocorre um aumento de 278 vezes na produção de

sedimentos. Isso permite afirmar que na área incremental entre as estações Saci e V5 estão presentes características que proporcionam maior disponibilidade e capacidade de transporte dos sedimentos nas áreas onde atuam os processos erosivos, bem como, condições de conectividade entre encostas e canais que possibilitam efetiva transferência dos sedimentos.

TABELA 8 – ESCOAMENTO E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

Bacia	Período 1 (12/10/2016 a 26/11/2016)	Período 2 (26/11/2016 a 23/12/2016)	Período 3 (23/12/2016 a 31/01/2017)	Média	CV (%)
Precipitação (mm)					
	201	172	221	198	12
Escoamento (m³)					
V1	2316	502	309	1042	106
V2	2957	1140	1351	1816	55
V3	1811	644	621	1025	66
Saci	10737	4073	4606	6472	57
V5	22849	7652	10864	13788	58
Produção de sedimentos (kg)					
Saci	19,7	7,6	10,7	12,7	49,6
V5	5175,9	1525,5	3882,3	3527,9	52,5
Produção específica de sedimentos (kg ha⁻¹)					
Saci	1,95	0,75	1,06	1,25	49,61
V5	280,38	82,64	210,31	191,11	52,46

FONTE: O autor (2017)

Nas características das áreas de drenagem (TABELA 4), são observadas diferenças relevantes no uso da terra. As proporções de áreas de plantio de *Pinus* e vegetação nativa apresentam pouca variação entre as bacias Saci e V5. Considerando que as taxas de erosão associadas a esses usos da terra apresentam literatura valores próximos (GRANDO et al., 2008; THOMAZ, 2005). Assim, a variação dessas áreas não apresenta influência relevante no aumento da produção de sedimentos. No entanto, a proporção de área ocupada por estradas não pavimentadas é aproximadamente 2 vezes maior na bacia V5 (TABELA 4). A presença de maior extensão de estradas na área de drenagem da estação V5 é importante para o aumento da produção de sedimentos pela característica de maior potencial de ocorrência de processos erosivos, quando comparado às áreas com cobertura vegetal presentes na área, e pela maior conectividade nas porções de estradas presentes na área incremental de drenagem. Além da diferença de área ocupada por estradas, são observadas diferenças na localização das estradas e

das estruturas que direcionam o escoamento para as encostas em direção aos canais. Na bacia Saci, a extensão dos caminhos do escoamento entre as estradas e o canal de drenagem, na nascente V1, é maior do que os observados para os caminhos de escoamento das estradas que drenam em direção aos canais a jusante da estação Saci e V3 que têm influência observada na estação V5. Dessa forma, o efeito das estradas não pavimentadas na bacia V5 se dá pela maior ocorrência de erosão, propiciada pela maior área ocupada, e pelas características que permitem maior conectividade com os canais de drenagem.

4.1.2. Caracterização dos sedimentos

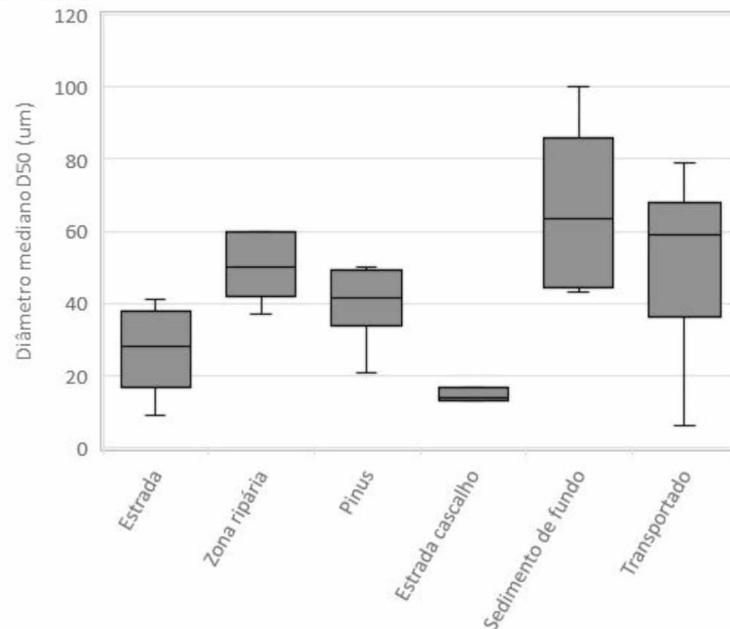
O diâmetro mediano das partículas (D_{50}) das amostras coletadas nas fontes de sedimentos e nos sedimentos de fundo são apresentados na FIGURA 23. Os sedimentos presentes nas estradas, tanto as cobertas com cascalho como as construídas utilizando apenas solo local, apresentam material mais fino comparado às demais fontes. Os sedimentos provenientes das estradas com aplicação de cascalho têm maior homogeneidade granulométrica com D_{50} médio de 15 μm . Os sedimentos coletados nos canais apresentam maior variação. Essa variação ocorre pela seletividade granulométrica do transporte de sedimentos. Os sedimentos transportados apresentam grande variação de diâmetro mediano com valor mínimo próximo do observado em estradas e máximo compatível com os sedimentos de fundo. Assim, pode haver nos sedimentos coletados em transporte a contribuição de sedimentos de fundo.

A granulometria dos sedimentos de fundo coletados em cada estação de monitoramento é apresentada na FIGURA 24. Os sedimentos das bacias V1 e V3 apresentam características similares, com predomínio da fração silte, sendo 54 % no canal do V1 e 53 % no canal do V3. Nesses pontos de monitoramento, percebe-se a semelhança de características granulométricas das fontes de sedimentos das encostas com plantio de pinus e da zona ripárias, nos quais foi observado, respectivamente, 55 e 49 % de silte. Assim, os sedimentos erodidos nas áreas a montante desses pontos são transferidos até o canal sem ocorrência de seleção granulométrica significativa. Nos demais pontos de monitoramento a granulometria apresenta relação consistente com as características do transporte do material erodido.

No ponto V2, o aumento na quantidade de areia em relação às áreas a montante está relacionado as altas declividades da área. Os sedimentos do fundo do canal da estação Saci, apresentam aumento na proporção da fração areia, que indicam a seleção do material durante os eventos de cheia. O mesmo não ocorre na estação V5, em que as vazões proporcionalmente

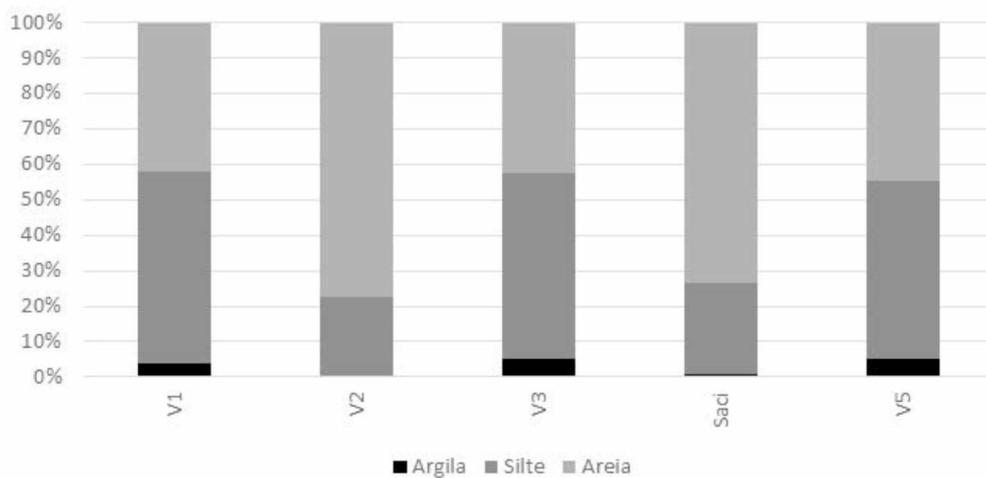
maiores poderiam ocasionar o maior grau de seleção. A diferença entre a granulometria dos sedimentos das estações Saci e V5 indica a produção de sedimentos com intensidades e fontes diferentes ocorrendo entre os dois pontos de monitoramento. Assim na estação V5 o maior aporte de sedimentos contribui para a deposição no canal, pela baixa declividade local, ocorrendo o aparecimento de frações granulométricas menores.

FIGURA 23 – DIÂMETRO MEDIANO DAS PARTÍCULAS (D50) DE SOLOS E SEDIMENTOS NA BACIA DO RIO SACI



FONTE: O autor (2017)

FIGURA 24 – GRANULOMETRIA DOS MATERIAIS DE FUNDO NOS PONTOS DE MONITORAMENTO



FONTE: O autor (2017)

4.1.3. Teor de carbono orgânico em sedimentos

Os teores de carbono orgânico determinados para as amostras de solos e material do fundo do canal são apresentados na TABELA 9. Os valores obtidos apresentaram significativa diferença nas fontes de sedimentos (FIGURA 25). Nas amostras relacionadas às estradas, foram encontrados os menores teores de carbono. Nas encostas cobertas por vegetação, os valores médios para as áreas com pinus e vegetação nativa são próximos, 78,5 e 80,7 mg/g, respectivamente.

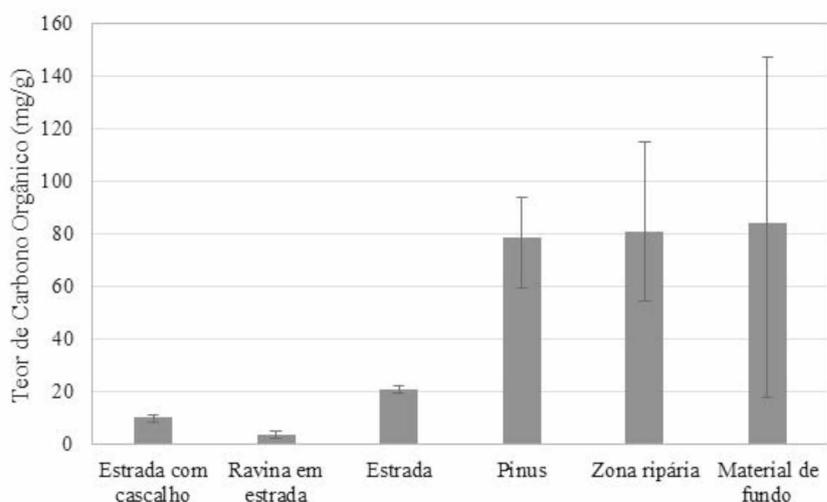
TABELA 9 – TEORES DE CARBONO ORGÂNICO NAS AMOSTRAS DE SOLOS E MATERIAL DE FUNDO

Amostra	Uso e cobertura da terra	Carbono orgânico (mg/g)
1		10,85
2	Estrada com cascalho	11,08
3		8,57
4		19,68
5	Superfície de Estrada	22,11
6		21,58
7		4,85
8	Ravina em Estrada	3,76
9		2,39
10		4,95
11		59,76
12		93,92
13	Vertentes/Pinus	92,46
14		73,12
15		79,22
16		72,85
17		67,81
18		81,84
19	Zona ripária/Vegetação nativa	54,59
20		84,75
21		115,31
V1		89,07
V2		147,47
Saci	Material de fundo	132,35
V3		35,75
V5		17,87

FONTE: O autor (2017)

Em estudo realizado em Campo Belo do Sul (SC), Mafra et al. (2008), encontraram teores de carbono orgânico de 56 mg/g em floresta nativa e de 45 mg/g em reflorestamento de *Pinus*. Esses autores atribuíram a pouca diferença no teor de carbono orgânico no solo ao fato de as taxas de adição de matéria orgânica serem controlada pela produção de serapilheira que apresenta valores semelhantes nesses dois tipos de cobertura vegetal. A maior variação do teor de carbono foi observada no material de fundo dos canais de drenagem, em que as amostras apresentam valores desde 17,18 mg/g, na amostra V5, compatível com os valores encontrados nas superfícies das estradas, até 147,47 mg/g na amostra V2 que corresponde ao maior valor observado.

FIGURA 25 – TEOR DE CARBONO EM SOLOS E SEDIMENTOS

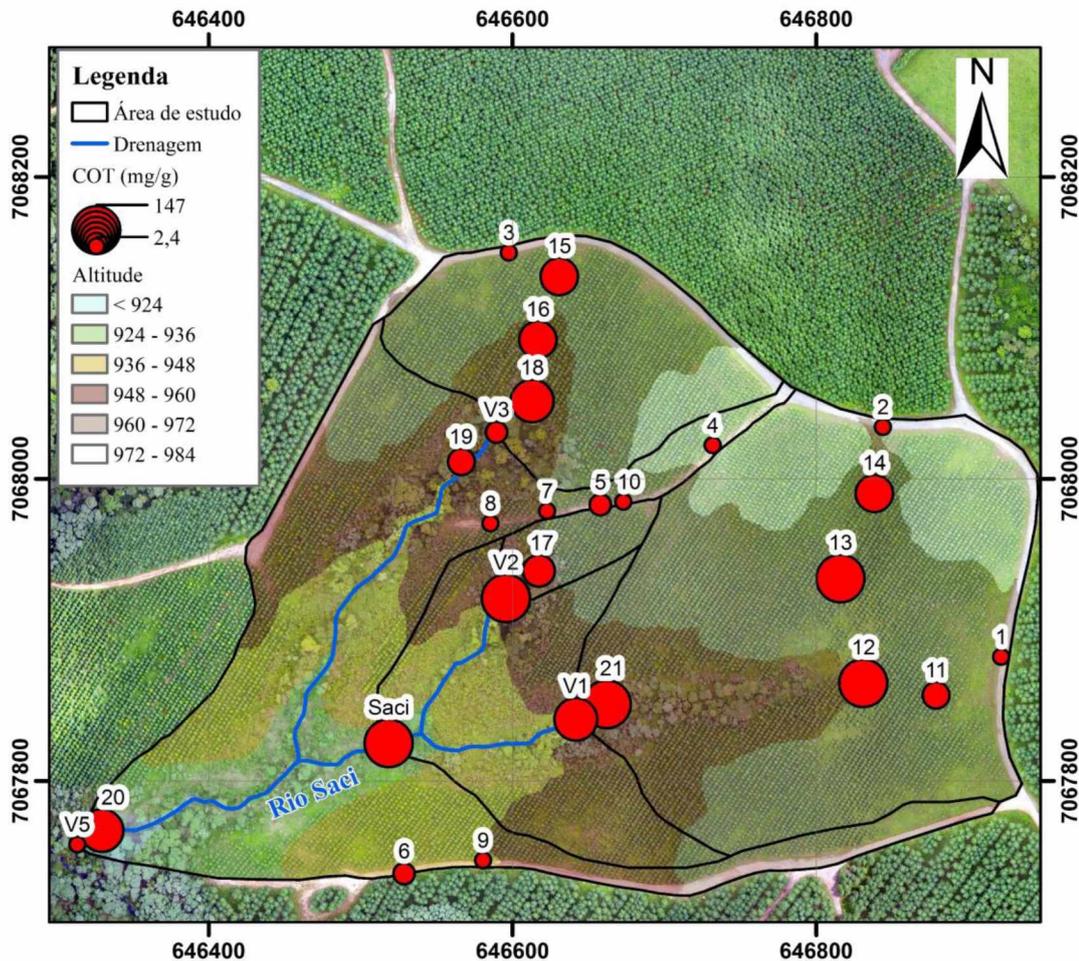


FONTE: O autor (2017)

Na área de drenagem da bacia Saci é observado o aumento do teor de carbono nas amostras no sentido do escoamento, sendo que as porções mais altas das encostas, amostras 11 e 14, possuem menos carbono orgânico que as localizadas na porção média (12 e 13), sendo que o maior valor é observado na zona ripária (amostra 21), para onde há a tendência de direcionamento de fluxos das encostas. Na zona ripária da bacia V2 (amostra 17), que possui a menor área de drenagem entre as áreas monitoradas, o teor de carbono é inferior ao observado na amostra da nascente V1. Essa relação entre teor de carbono, área de drenagem e posição na encosta mostra a importância da contribuição de matéria orgânica transportado de áreas a montante (PEI et al., 2010). Na área de drenagem da bacia V3 não foi observada a mesma

tendência de aumento de teores de carbono orgânico ao longo das encostas, havendo menores teores de carbono nas encostas e no material de fundo, quando comparado com a área da bacia Saci.

FIGURA 26 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO CARBONO ORGÂNICO TOTAL NAS AMOSTRAS



FONTE: O autor (2017)

Os teores de carbono orgânico nos sedimentos transportados são apresentados na TABELA 10. Para os três períodos os maiores valores foram observados nas estações V1, V2 e Saci, seguido por V3 e V5. Para as estações localizadas dentro da bacia Saci, a quantidade de carbono nos sedimentos transportados é inversamente proporcional à área de drenagem de cada sub-bacia, sendo que essa relação decrescente dos pontos V2, V1 e Saci foi observada nos três

períodos. Na bacia V5 as quantidades de carbono são muito inferiores às observadas nas demais bacias, com média de 11,6 mg/g.

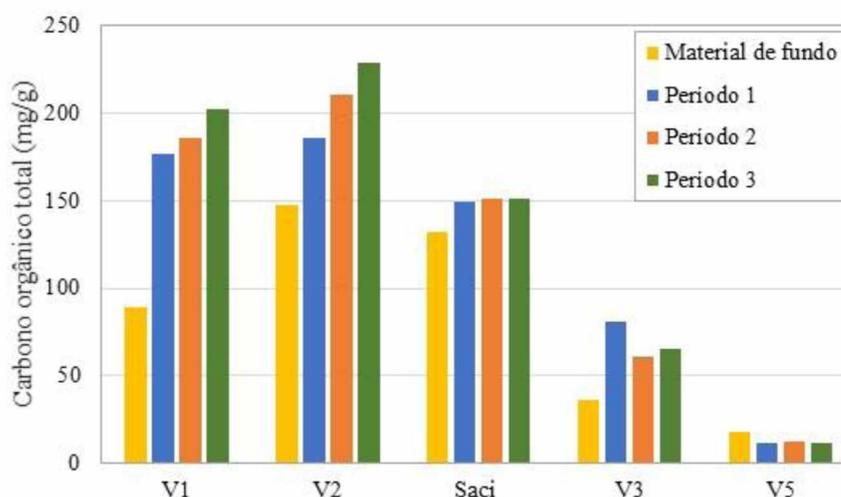
Em cada um dos pontos de monitoramento foi observada pouca variação no teor de carbono entre os três períodos, sendo que os coeficientes de variação apresentaram valores entre 0,8 e 15,2 %, enquanto que, para esses períodos o escoamento (TABELA 8) apresentou valores de coeficiente de variação entre 55 e 106 %. A pouca variação no teor de carbono orgânico mostra que não ocorreu dentro das bacias, ao longo dos três períodos, a contribuição de fontes de sedimentos diferentes que possibilitassem mudanças no teor de carbono dos sedimentos (MEYBECK; MOATAR, 2014). Assim, as variações nas quantidades de carbono presentes nos sedimentos se deram em função da distribuição espacial, com variação importante entre as bacias, e com pouca variação no tempo.

TABELA 10 –TEORES DE CARBONO ORGÂNICO EM SEDIMENTOS TRANSPORTADOS

Bacia	Carbono orgânico total (mg/g)				CV (%)
	Período 1	Período 2	Período 3	Média	
V1	177	186	202	188	6,8
V2	186	211	229	209	10,4
Saci	149	151	151	150	0,8
V3	81	61	65	69	15,2
V5	11,4	12,0	11,4	11,6	3,1

FONTE: O autor (2017)

FIGURA 27 – TEOR DE CARBONO NO MATERIAL DE FUNDO E EM SEDIMENTOS TRANSPORTADOS



FONTE: O autor (2017)

Nas bacias V1, V2, V3 e Saci o teor de carbono orgânico nos sedimentos transportados foi superior ao observado no material de fundo de cada estação (FIGURA 27). Isso mostra que nessas bacias durante o transporte ocorre seleção do material de menor densidade e rico em matéria orgânica (RHOTON et al., 2006; WANG et al., 2010; BOIX-FAYOS et al., 2015). Na estação V5 essa relação não é observada. A maior quantidade de sedimentos observada na bacia V5 permite concluir que os sedimentos transportados das áreas a montante são diluídos pela entrada no canal de grandes quantidades de sedimentos erodidos nas estradas que resultam na redução do teor de carbono observado nos sedimentos transportados.

4.1.4. Relação entre fontes e sedimentos transportados

Na TABELA 11 são apresentadas as concentrações relativas dos elementos químicos identificados em cada amostra de solos, material de fundo dos canais e de sedimentos transportados nos dois primeiros períodos de monitoramento. Os elementos com maiores concentrações identificados nas amostras foram o silício, ferro e alumínio, encontrados em abundância na fração mineral dos solos (SPOSITO, 2008). Nas amostras com maior quantidade de material orgânico foram identificados enxofre e fósforo.

Para a análise de agrupamento foram desconsiderados os valores de Cl, Cu e Mn por apresentarem valores baixos, em poucas amostras e por não ser característicos de nenhum tipo de uso da terra. Os teores de carbono orgânico foram inseridos na análise juntamente com os demais elementos químicos identificados. Na análise de componentes principais as três primeiras componentes explicaram 97 % da dispersão dos dados. Assim, essas três componentes foram utilizadas para definir o agrupamento dos pontos amostrados que resultaram em cinco grupos distintos (FIGURA 28).

A distribuição espacial dos grupos definidos é apresentada na FIGURA 29. As amostras de encostas com *Pinus* e vegetação nativa em zona ripária não apresentaram características distintas. No grupo 1 foram incluídas as amostras da zona ripária próxima as estações V1 e V2, além de duas amostras de encosta localizada na mesma linha de drenagem (amostras 13 e 14) e o material de fundo das estações V1, V2 e Saci. As demais amostras de encosta com plantio de *Pinus* e zona ripária formaram o grupo 2 por tipo de vegetação que permitisse que fossem separadas em grupos distintos.

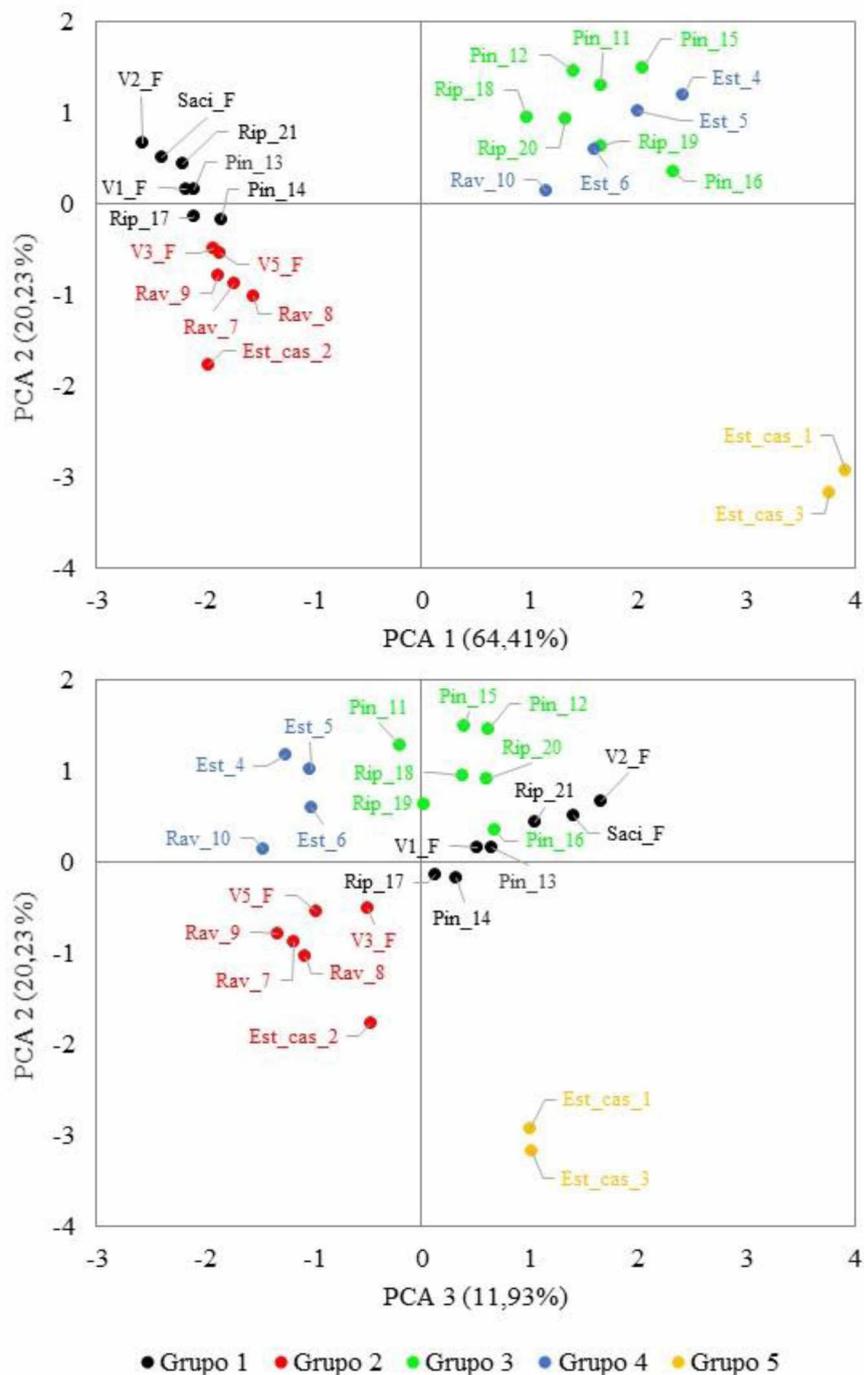
TABELA 11 – RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA ELEMENTAR MEV/EDS

N.	Descrição	Concentração por elemento identificado (%)												
		Si	Al	Fe	K	Ti	Mg	Na	Ca	S	P	Cl	Cu	Mn
1	Estrada cascalho	22,14	10,61	12,3	3	0,79	1,3	0,37	0,39	0,04	0	0	0	0
2		4,25	1,35	1,26	0,54	0,13	0,43	0,26	0,11	0	0	0	0	0
3		22,84	10	11,85	2,83	0,69	1,43	0,57	0,57	0,05	0,04	0	0	0
4	Superfície de Estrada	21,69	13,2	16,44	0,49	0,93	0,23	0	0	0	0,08	0	0	0
5		25,13	11,96	10,41	0,56	0,98	0,22	0	0	0,03	0,04	0	0	0
6		20,45	11,78	11,42	0,59	0,75	0,27	0	0	0,07	0	0	0	0
7	Ravina em Estrada	6,98	4,96	1,72	0,33	0,13	0,14	0	0	0	0	0	0,11	0
8		7,27	4,83	1,5	0,54	0,19	0,16	0	0	0	0,02	0	0	0
9		6,72	4,64	1,98	0,23	0,1	0,09	0	0	0	0,01	0	0	0
10		21,7	12,52	9,86	0,63	0,34	0,22	0	0	0	0	0	0	0
11	Vertentes/ Pinus	23,22	10,27	12	0,52	0,94	0,24	0	0	0,11	0,04	0	0	0
12		23,94	9,29	11,07	0,75	0,89	0,2	0	0	0,14	0	0	0	0
13		7,92	3,06	1,85	0,19	0,25	0,15	0,02	0,04	0,03	0,02	0	0	0
14		6,95	3,77	2,05	0,29	0,27	0,21	0,08	0,05	0,02	0,02	0	0,07	0
15		22,94	10,14	11,8	0,66	1,24	0,32	0	0	0,11	0,08	0	0	0
16		22,77	11,63	11,15	1,4	0,9	0,51	0,18	0	0,08	0,07	0	0	0
17	Zona ripária/ Vegetação nativa	8,17	3,19	1,47	0,27	0,18	0,11	0	0,07	0,03	0,01	0	0	0
18		24,09	9,11	9,9	0,75	0,57	0,23	0	0	0,14	0,13	0	0	0
19		24,75	9,92	9,17	1,05	0,85	0,28	0	0	0,08	0,1	0	0	0
20		25,65	9,3	8,87	0,94	0,74	0,28	0	0	0,06	0,09	0	0	0
21		8,04	3,62	1,62	0,25	0,2	0,1	0	0	0,04	0,03	0	0	0
V1	Material de fundo	7,57	3,4	1,65	0,22	0,2	0,1	0,03	0,03	0,05	0,03	0	0	0
V2		5,27	3,91	1,2	0,2	0,12	0,1	0,04	0,07	0,13	0,13	0	0	0,06
Saci		5,82	3,5	1,67	0,25	0,18	0,11	0,05	0,15	0,12	0,04	0	0	0
V3		8,17	3,33	1,65	0,28	0,2	0,13	0	0,05	0,02	0,01	0	0	0
V5		8,27	4,02	1,62	0,19	0,19	0,1	0,01	0	0,01	0	0	0,2	0
V1_T1	Sedimento transportado / Período 1	5,6	3,59	1,52	0,21	0,14	0,09	0	0,06	0,13	0,07	0,15	0	0
V2_T1		4,49	3,57	1,09	0,19	0,11	0,11	0	0,11	0,19	0,15	0,02	0,34	0,09
Saci_T1		5,76	4,05	2,23	0,31	0,21	0,12	0,06	0,08	0,13	0,05	0	0	0,06
V3_T1		5,5	3,54	4,79	0,33	0,2	0,14	0,04	0,09	0,07	0,04	0,1	0	0,05
V5_T1		8,61	3,21	1,23	0,19	0,15	0,09	0,01	0	0	0	0	0	0
V1_T2	Sedimento transportado / Período 2	17,95	11,06	11,67	0,74	0,52	0,28	0	0,36	0,45	0,36	0	0	0
V2_T2		15,92	12,06	8,28	0,84	0,77	0,24	0	0,35	0,44	0,8	0	0	0
Saci_T2		19,22	10,92	10,36	1,04	0,96	0,32	0,07	0,32	0,29	0,22	0	0	0
V3_T2		20,91	11,29	12,87	1,17	0,86	0,34	0,09	0,81	0,08	0,11	0	0	0
V5_T2		22,67	12,92	10,17	1,08	0,8	0,28	0	0	0	0	0	0	0

FONTE: O autor (2017)

O grupo 1 mostrou a similaridade entre os solos da zona ripária e porções da vertente com plantio de *Pinus* e material de fundo coletados nas estações dentro da área de drenagem da bacia Saci. As amostras de solos das estradas formaram três grupos que aproximaram amostras de cada um dos tipos de estradas. No entanto, não houve separação correta de todas as amostras.

FIGURA 28 – COMPONENTES PRINCIPAIS E GRUPOS DEFINIDOS PARA FONTES DE SEDIMENTOS



FONTE: O autor (2017)

No grupo 2 predominam as ravinas em estradas, no grupo 4 as amostras da superfície do leito das estradas e no grupo 5 as estradas com cascalho. A amostra 2, retirada da estrada com cascalho foi classificada juntamente de amostras coletadas em ravinas. A similaridade pode ter ocorrido pela deposição de sedimentos no local em que foi coletada a amostra, que está localizada em uma porção da estrada sujeita ao acúmulo de escoamento, sendo que os sedimentos das ravinas são característicos da camada subsuperficial do solo. A influência de sedimentos erodidos no leito da estrada e depositados no fundo da ravina podem também ser o motivo para que a amostra 10 tenha sido agrupada com as amostras coletadas no leito de estradas.

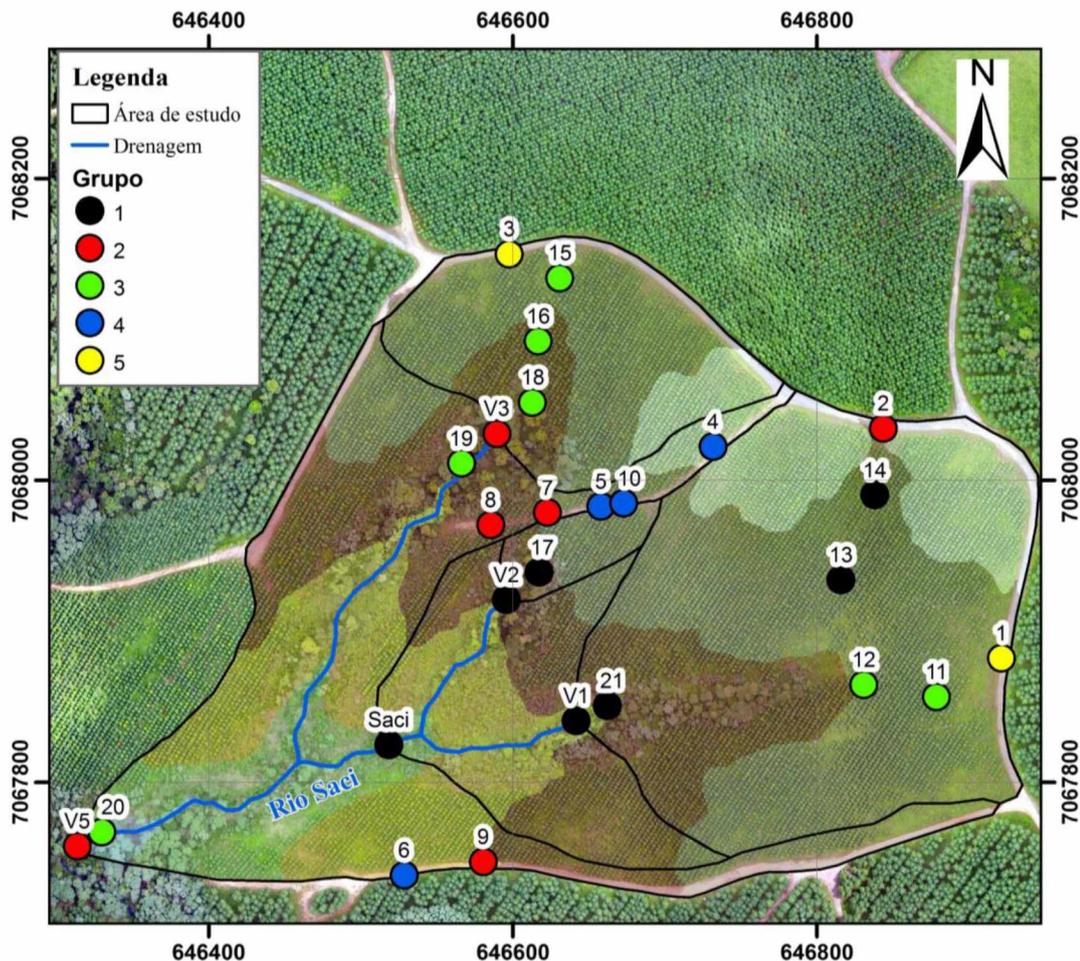
As amostras de material de fundo das estações V3 e V5 mostraram similaridade com as amostras coletadas em ravinas. No caso da amostra V5, a contribuição de sedimentos provenientes de ravinas em estradas é consistente com observações em campo, sendo que as estradas com o desenvolvimento de ravinas, nas quais foram coletadas as amostras 7, 8 e 9, apresentam indícios de conexão com os canais de drenagem da área incremental da bacia V5. A inclusão do material de fundo da estação V3, pode ter ocorrido devido ao fato de essa nascente estar localizada em uma altitude superior às demais, sendo que o canal se desenvolve sobre camadas de solo, e não em leito rochoso como nas nascentes V1 e V2. Dessa forma os sedimentos depositados no canal V3 pode apresentar características semelhantes às camadas subsuperficiais do solo.

Inserindo as amostras de sedimentos transportados na análise de agrupamento, foram definidos sete grupos, de forma que não fossem unidos grupos anteriormente definidos para as amostras das fontes de sedimentos. Os grupos são apresentados na FIGURA 30, destacando as amostras de sedimentos transportados e as amostras que estão em grupos diferentes dos definidos apenas com amostras de solos e material de fundo.

Ao inserir os pontos correspondentes às amostras de sedimentos transportados, ocorreu a sua incorporação em grupos anteriormente formados pelas fontes e também agrupamento dos novos pontos. As amostras de sedimentos transportados das estações V1, V2 e Saci no período 1, se agruparam com as amostras do material de fundo do canal das estações V2 e Saci, formando um novo grupo. Para o período 2, as amostras das estações V1, V2 e Saci, assim como no período 1, formaram um grupo isolado das demais amostras. A similaridade entre os sedimentos nesses três pontos, com características que os diferenciam das demais possíveis fontes de sedimentos, juntamente com a característica de alto teor de matéria orgânica observado anteriormente, permite concluir que os sedimentos são transportados a partir do canal

drenagem, com conectividade limitada das encostas e desconectividade das estradas presentes na área de drenagem.

FIGURA 29 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS AMOSTRAS DE ACORDO COM A ANÁLISE DE AGRUPAMENTO

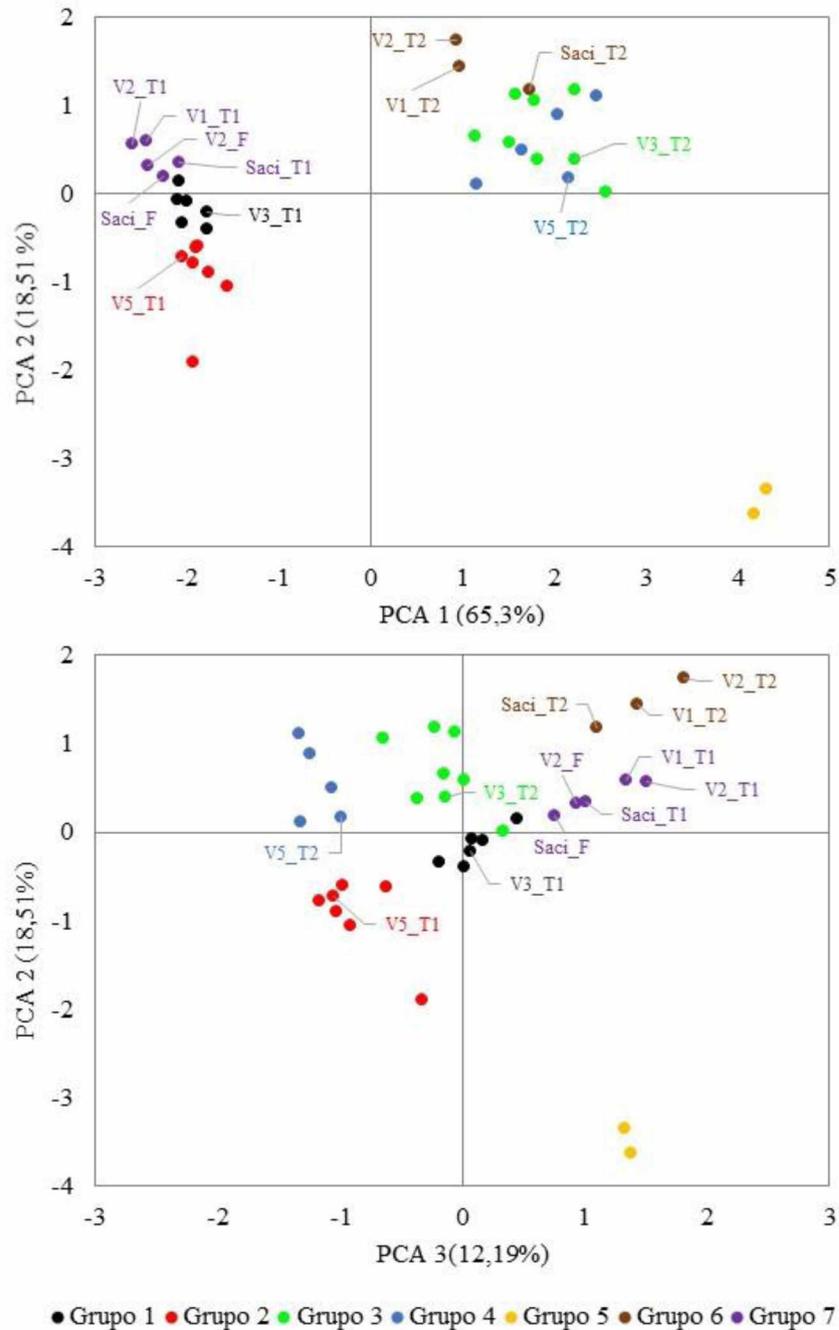


FONTE: O autor (2017)

Os sedimentos da estação V3 se aproximaram das amostras característica da zona ripária e encostas próximas. Se diferenciando do material de fundo que possui características que se assemelham aos sedimentos das ravinas. Os sedimentos do V5, no período 1 apresentaram características que propiciaram sua inclusão no grupo das amostras características das ravinas das estradas e também do material de fundo do canal próximo à estação V5. No período 2 os sedimentos com as amostras características do leito das estradas. Mostram que existe contribuição relevante de sedimentos das estradas, sendo que no período 1 em que a geração de escoamento foi de 22849 m³, os sedimentos transportados são provenientes das ravinas,

enquanto no período 2 em que ocorreu menor escoamento (7652 m³) os sedimentos são provenientes do leito das estradas.

FIGURA 30 – COMPONENTES PRINCIPAIS E GRUPOS DEFINIDOS PARA FONTES E SEDIMENTOS TRANSPORTADOS.



FONTE: O autor (2017)

A identificação das fontes predominantes na estação Saci e V5 contribuem para a explicar a diferença entre a produção total de sedimentos observada entre as duas estações

TABELA 8. No caso da estação V5 as erosões mais intensas, observadas nas estradas, se conectam aos canais resultando na maior produção de sedimentos, enquanto na área de drenagem da estação Saci não ocorre erosão intensa, com sedimentos provenientes de áreas próximas aos canais. Dessa forma, a análise permitiu reconhecer porções das bacias com conectividade limitada e desconectividade, que contribuem para a compreensão dos processos de transferência de sedimentos para os períodos analisados.

O fato de amostras coletadas no mesmo tipo de uso da terra não terem sido classificadas no mesmo grupo mostra a complexidade da distribuição espacial, assim como, limitação de classifica-las por meio dos valores das características analisadas. Além disso, as diferenças granulométricas e da quantidade da matéria orgânica são apontadas como fatores que dificultam a definição de amostras que compõem as fontes de sedimentos (WALLING, 2013).

4.2. CONECTIVIDADE HIDROSSEDIMENTOLÓGICA

4.2.1. Análise da conectividade hidrossedimentológica em eventos

4.2.1.1. Conectividade do escoamento superficial

No período de monitoramento foram identificados 26 eventos. As características de precipitação e escoamento observadas em cada bacia são apresentadas a seguir (TABELA 12 a TABELA 16). A precipitação total dos eventos variou entre 3,8 mm (evento 9) e 33,8 mm (evento 18). A intensidade máxima da precipitação (I_{10}) observada variou entre 3 mm/h (evento 12) e 84 mm/h (evento 18). Destaca-se que mesmo eventos com baixa pluviosidade apresentaram resposta hidrológica com aumento de vazão observada na estação V5, e, portanto, foram considerados nas análises. A relação entre precipitação e escoamento superficial observados nas bacias é apresentada na FIGURA 31. Nas três nascentes os volumes de escoamento superficial são semelhantes. Em média, o escoamento superficial gerado nas bacias V1 e V2 foi de 1,1 m³ e na bacia V3, 1,3 m³. Nessas três bacias, não houve geração de escoamento superficial nos eventos 1, 6, 9, 12, 13, 19 e 25. Nos eventos 12 e 19 não foi observado escoamento superficial na bacia Saci.

TABELA 12 - CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO E ESCOAMENTO NOS EVENTOS NA BACIA V5

N	Data	Precipitação			Escoamento							
		P (mm)	I ₁₀ (mm/h)	I ₃₀ (mm/h)	Q _i (L s ⁻¹)	Q _{pico} (L s ⁻¹)	T _{pico} (h)	Ro (mm)	Vo (m ³)	Ro/P (%)	Ac (m ²)*	Ac (%)
1	25/11/2016	7,4	12,2	8,6	2,65	3,75	1,50	0,04	6,82	0,50	926	0,50
2	27/11/2016	22,9	74,7	38,6	2,49	37,61	0,50	0,42	76,79	1,82	<u>3359</u>	1,82
3	28/11/2016	21,8	50,3	34,5	2,73	26,04	0,33	0,52	95,66	2,37	<u>4379</u>	2,37
4	29/11/2016	14,5	12,2	9,1	2,82	13,00	0,67	0,50	92,93	3,48	<u>6419</u>	3,48
5	03/12/2016	32,3	30,5	25,9	2,73	38,02	0,58	0,81	150,35	2,50	<u>4623</u>	2,50
6	08/12/2016	8,4	13,7	8,1	3,45	4,05	1,17	0,04	6,59	0,43	786	0,43
7	09/12/2016	11,4	10,7	6,6	3,36	7,08	1,00	0,08	15,36	0,73	1343	0,73
8	10/12/2016	12,4	6,1	6,1	3,36	10,60	0,58	0,36	66,11	2,88	<u>5312</u>	2,88
9	13/12/2016	3,8	15,2	6,1	2,99	4,95	0,67	0,04	7,43	1,06	1951	1,06
10	18/12/2016	8,9	25,9	13,2	2,49	9,51	0,50	0,13	24,70	1,51	2778	1,51
11	20/12/2016	9,4	13,7	10,2	2,65	7,53	0,83	0,09	17,31	1,00	1841	1,00
12	21/12/2016	4,1	3,0	2,0	2,49	3,17	3,33	0,03	4,64	0,62	1142	0,62
13	27/12/2016	8,9	21,3	13,2	1,91	2,49	1,50	0,02	3,32	0,20	374	0,20
14	31/12/2016	22,8	53,3	29,5	1,91	21,19	0,50	0,39	72,62	1,72	<u>3179</u>	1,72
15	01/01/2017	5,3	25,5	10,5	1,47	13,22	0,50	0,15	28,55	2,95	<u>5438</u>	2,95
16	05/01/2017	24,5	13,5	9,0	1,20	13,65	0,67	0,63	117,00	2,59	<u>4776</u>	2,59
17	06/01/2017	14,5	16,5	14,0	2,04	20,62	0,83	0,81	149,40	5,58	<u>10303</u>	5,58
18	11/01/2017	33,8	84,0	50,5	2,41	85,51	0,50	1,27	235,19	3,77	<u>6969</u>	3,77
19	22/01/2017	5,0	12,0	8,0	2,90	3,17	1,50	0,01	1,59	0,17	318	0,17
20	23/01/2017	8,3	19,5	15,5	2,82	5,44	0,67	0,07	13,54	0,89	1642	0,89
21	24/01/2017	18,0	54,0	35,5	2,73	24,15	0,33	0,35	64,77	1,95	<u>3598</u>	1,95
22	25/01/2017	19,5	39,0	21,5	3,55	32,97	0,17	0,64	117,33	3,26	<u>6017</u>	3,26
23	25/01/2017	18,0	42,0	30,5	3,75	37,61	0,17	0,84	155,09	4,67	<u>8616</u>	4,67
24	26/01/2017	12,5	39,0	23,5	3,26	28,36	0,33	0,52	96,12	4,17	<u>7690</u>	4,17
25	02/02/2017	11,3	22,5	11,0	3,45	7,69	0,33	0,06	11,47	0,55	1020	0,55
26	03/02/2017	16,0	43,5	24,5	3,36	30,08	0,50	0,54	100,09	3,39	<u>6256</u>	3,39

FONTE: O autor (2017)

LEGENDA: P é a precipitação total do evento; I₁₀ é a intensidade máxima em 10 minutos. I₃₀ é a intensidade máxima em 30 minutos. Q_i é a vazão inicial do evento. Q_{pico} é a vazão de pico do evento. Ro é o escoamento superficial. Vo é volume de escoamento superficial. Ac é a área de contribuição do escoamento.

NOTA:* Valores sublinhados são eventos com área de contribuição de escoamento superficial superior a área saturada da zona ripária.

TABELA 13 - CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO E ESCOAMENTO NOS EVENTOS NA BACIA SACI

(continua)

N	Data	Precipitação			Escoamento							
		P (mm)	I ₁₀ (mm/h)	I ₃₀ (mm/h)	Q _i (L s ⁻¹)	Q _{pico} (L s ⁻¹)	T _{pico} (h)	Ro (mm)	Vo (m ³)	Ro/P (%)	Ac (m ²)	Ac (%)
1	25/11/2016	7,4	12,2	8,6	1,65	2,11	1,00	0,03	2,81	0,38	381	0,38
2	27/11/2016	22,9	74,7	38,6	1,42	4,89	0,67	0,14	14,09	0,61	616	0,61
3	28/11/2016	21,8	50,3	34,5	1,42	4,01	0,67	0,14	14,42	0,65	660	0,65
4	29/11/2016	14,5	12,2	9,1	1,53	2,88	0,83	0,16	16,58	1,13	1145	1,13
5	03/12/2016	32,3	30,5	25,9	1,53	5,49	0,58	0,32	32,86	1,01	1019	1,01

(conclusão)

N	Data	Precipitação			Escoamento							
		P (mm)	I ₁₀ (mm/h)	I ₃₀ (mm/h)	Q _i (L s ⁻¹)	Q _{pico} (L s ⁻¹)	T _{pico} (h)	Ro (mm)	Vo (m ³)	Ro/P (%)	Ac (m ²)	Ac (%)
6	08/12/2016	8,4	13,7	8,1	1,90	2,18	1,00	0,02	2,23	0,26	266	0,26
7	09/12/2016	11,4	10,7	6,6	1,90	2,40	1,00	0,03	3,02	0,26	265	0,26
8	10/12/2016	12,4	6,1	6,1	1,90	2,97	0,75	0,10	9,73	0,77	781	0,77
9	13/12/2016	3,8	15,2	6,1	1,71	2,11	0,67	0,02	2,35	0,61	616	0,61
10	18/12/2016	8,9	25,9	13,2	1,53	2,18	0,83	0,05	4,60	0,51	518	0,51
11	20/12/2016	9,4	13,7	10,2	1,59	2,04	1,08	0,02	2,01	0,21	214	0,21
12	21/12/2016	4,1	3,0	2,0	1,47	-	-	0,00	0,00	0,00	0	0,00
13	27/12/2016	8,9	21,3	13,2	1,21	1,42	0,83	0,01	0,85	0,09	95	0,09
14	31/12/2016	22,8	53,3	29,5	1,11	2,97	0,67	0,12	11,66	0,50	511	0,50
15	01/01/2017	5,3	25,5	10,5	1,02	1,77	0,67	0,03	2,90	0,55	552	0,55
16	05/01/2017	24,5	13,5	9,0	0,89	2,63	0,83	0,19	18,78	0,76	767	0,76
17	06/01/2017	14,5	16,5	14,0	1,11	3,42	0,83	0,24	24,65	1,68	1700	1,68
18	11/01/2017	33,8	84,0	50,5	1,16	10,26	0,50	0,40	40,07	1,17	1187	1,17
19	22/01/2017	5,0	12,0	8,0	1,21	-	-	0,00	0,00	0,00	0	0,00
20	23/01/2017	8,3	19,5	15,5	1,11	1,90	0,67	0,04	3,60	0,43	436	0,43
21	24/01/2017	18,0	54,0	35,5	1,06	3,81	0,50	0,10	10,40	0,57	578	0,57
22	25/01/2017	19,5	39,0	21,5	1,31	4,66	0,50	0,17	17,06	0,86	875	0,86
23	25/01/2017	18,0	42,0	30,5	1,31	5,12	0,50	0,23	23,23	1,28	1290	1,28
24	26/01/2017	12,5	39,0	23,5	1,21	3,91	0,50	0,16	16,57	1,31	1325	1,31
25	02/02/2017	11,3	22,5	11,0	1,36	1,71	0,67	0,01	1,14	0,10	101	0,10
26	03/02/2017	16,0	43,5	24,5	1,36	3,81	0,83	0,12	11,89	0,73	743	0,73

FONTE: O autor (2017)

LEGENDA: P é a precipitação total do evento. I₁₀ é a intensidade máxima em 10 minutos. I₃₀ é a intensidade máxima em 30 minutos.; Q_i é a vazão inicial do evento; Q_{pico} é a vazão de pico do evento. Ro é o escoamento superficial. Vo é volume de escoamento superficial. Ac é a área de contribuição do escoamento.

TABELA 14 – CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO E ESCOAMENTO NOS EVENTOS NA BACIA VI

(continua)

N	Data	Precipitação			Escoamento							
		P (mm)	I ₁₀ (mm/h)	I ₃₀ (mm/h)	Q _i (L s ⁻¹)	Q _{pico} (L s ⁻¹)	T _{pico} (h)	Ro (mm)	Vo (m ³)	Ro/P (%)	Ac (m ²)	Ac (%)
1	25/11/2016	7,4	12,2	8,6	0,22	-	-	0,00	0,00	0,00	0	0,00
2	27/11/2016	22,9	74,7	38,6	0,14	0,51	0,33	0,03	2,11	0,13	92	0,13
3	28/11/2016	21,8	50,3	34,5	0,15	0,37	0,33	0,03	1,80	0,12	83	0,12
4	29/11/2016	14,5	12,2	9,1	0,15	0,30	1,83	0,03	2,25	0,23	156	0,23
5	03/12/2016	32,3	30,5	25,9	0,17	0,51	0,42	0,06	4,13	0,19	128	0,19
6	08/12/2016	8,4	13,7	8,1	0,26	-	-	0,00	0,00	0,00	0	0,00
7	09/12/2016	11,4	10,7	6,6	0,26	0,30	0,67	0,01	0,41	0,05	35	0,05
8	10/12/2016	12,4	6,1	6,1	0,26	0,37	0,75	0,01	0,97	0,11	78	0,11
9	13/12/2016	3,8	15,2	6,1	0,22	-	-	0,00	0,00	0,00	0	0,00
10	18/12/2016	8,9	25,9	13,2	0,19	0,24	0,33	0,00	0,29	0,05	33	0,05
11	20/12/2016	9,4	13,7	10,2	0,17	0,22	0,58	0,00	0,16	0,03	17	0,03
12	21/12/2016	4,1	3,0	2,0	0,15	-	-	0,00	0,00	0,00	0	0,00
13	27/12/2016	8,9	21,3	13,2	0,11	-	-	0,00	0,00	0,00	0	0,00

(conclusão)

N	Data	Precipitação			Escoamento							
		P (mm)	I ₁₀ (mm/h)	I ₃₀ (mm/h)	Q _i (L s ⁻¹)	Q _{pico} (L s ⁻¹)	T _{pico} (h)	Ro (mm)	Vo (m ³)	Ro/P (%)	Ac (m ²)	Ac (%)
14	31/12/2016	22,8	53,3	29,5	0,11	0,28	0,33	0,01	0,40	0,03	17	0,03
15	01/01/2017	5,3	25,5	10,5	0,08	0,13	0,33	0,00	0,15	0,04	28	0,04
16	05/01/2017	24,5	13,5	9,0	0,08	0,24	0,50	0,03	2,17	0,13	89	0,13
17	06/01/2017	14,5	16,5	14,0	0,07	0,28	0,67	0,04	2,99	0,30	206	0,30
18	11/01/2017	33,8	84,0	50,5	0,09	0,72	0,33	0,06	4,16	0,18	123	0,18
19	22/01/2017	5,0	12,0	8,0	0,10	-	-	0,00	0,00	0,00	0	0,00
20	23/01/2017	8,3	19,5	15,5	0,06	0,15	0,17	0,01	0,38	0,07	47	0,07
21	24/01/2017	18,0	54,0	35,5	0,06	0,26	0,17	0,01	0,60	0,05	33	0,05
22	25/01/2017	19,5	39,0	21,5	0,08	0,33	0,33	0,02	1,57	0,12	80	0,12
23	25/01/2017	18,0	42,0	30,5	0,11	0,35	0,17	0,03	1,84	0,15	102	0,15
24	26/01/2017	12,5	39,0	23,5	0,07	0,26	0,17	0,02	1,22	0,14	98	0,14
25	02/02/2017	11,3	22,5	11,0	0,17	0,19	0,25	0,00	0,00	0,00	0	0,00
26	03/02/2017	16,0	43,5	24,5	0,14	0,37	0,33	0,02	1,12	0,10	70	0,10

FONTE: O autor (2017)

LEGENDA: P é a precipitação total do evento. I₁₀ é a intensidade máxima em 10 minutos. I₃₀ é a intensidade máxima em 30 minutos. Q_i é a vazão inicial do evento. Q_{pico} é a vazão de pico do evento. Ro é o escoamento. Superficial. Vo é volume de escoamento superficial. Ac é a área de contribuição do escoamento.

TABELA 15 – CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO E ESCOAMENTO NOS EVENTOS NA BACIA V2

(continua)

N	Data	Precipitação			Escoamento							
		P (mm)	I ₁₀ (mm/h)	I ₃₀ (mm/h)	Q _i (L s ⁻¹)	Q _{pico} (L s ⁻¹)	T _{pico} (h)	Ro (mm)	Vo (m ³)	Ro/P (%)	Ac (m ²)	Ac (%)
1	25/11/2016	7,4	12,2	8,6	0,51	-	-	0,00	0,0	0,00	0	0,0
2	27/11/2016	22,9	74,7	38,6	0,51	1,4	0,3	0,28	1,1	1,22	50	1,2
3	28/11/2016	21,8	50,3	34,5	0,48	0,9	0,3	0,31	1,3	1,43	59	1,4
4	29/11/2016	14,5	12,2	9,1	0,48	0,6	0,5	0,16	0,7	1,12	46	1,1
5	03/12/2016	32,3	30,5	25,9	0,45	1,1	0,4	0,78	3,2	2,42	100	2,4
6	08/12/2016	8,4	13,7	8,1	0,51	-	-	0,00	0,0	0,00	0	0,0
7	09/12/2016	11,4	10,7	6,6	0,51	0,6	0,7	0,11	0,5	1,00	41	1,0
8	10/12/2016	12,4	6,1	6,1	0,51	0,7	0,4	0,27	1,1	2,19	90	2,2
9	13/12/2016	3,8	15,2	6,1	0,48	-	-	0,00	0,0	0,00	0	0,0
10	18/12/2016	8,9	25,9	13,2	0,45	0,7	0,3	0,18	0,7	2,02	83	2,0
11	20/12/2016	9,4	13,7	10,2	0,45	0,5	0,4	0,09	0,4	0,96	40	1,0
12	21/12/2016	4,1	3,0	2,0	0,45	-	-	0,00	0,0	0,00	0	0,00
13	27/12/2016	8,9	21,3	13,2	0,4	-	-	0,00	0,0	0,00	0	0,0
14	31/12/2016	22,8	53,3	29,5	0,3	0,8	0,7	0,58	2,4	2,55	105	2,6
15	01/01/2017	5,3	25,5	10,5	0,4	0,5	0,7	0,16	0,7	3,08	127	3,1
16	05/01/2017	24,5	13,5	9,0	0,3	0,7	0,8	0,75	3,1	3,04	126	3,0
17	06/01/2017	14,5	16,5	14,0	0,3	0,9	0,8	0,77	3,2	5,29	219	5,3
18	11/01/2017	33,8	84,0	50,5	0,3	1,8	0,5	1,63	6,7	4,84	200	4,8
19	22/01/2017	5,0	12,0	8,0	0,4	-	-	0,00	0,0	0,00	0	0,0
20	23/01/2017	8,3	19,5	15,5	0,4	0,5	0,2	0,04	0,2	0,53	22	0,5
21	24/01/2017	18,0	54,0	35,5	0,4	1,0	0,2	0,10	0,4	0,57	24	0,6

(conclusão)

N	Data	Precipitação			Escoamento							
		P (mm)	I ₁₀ (mm/h)	I ₃₀ (mm/h)	Qi (L s ⁻¹)	Qpico (L s ⁻¹)	Tpico (h)	Ro (mm)	Vo (m ³)	Ro/P (%)	Ac (m ²)	Ac (%)
22	25/01/2017	19,5	39,0	21,5	0,4	0,8	0,2	0,17	0,7	0,88	36	0,9
23	25/01/2017	18,0	42,0	30,5	0,4	1,1	0,2	0,37	1,5	2,04	84	2,0
24	26/01/2017	12,5	39,0	23,5	0,4	0,7	0,2	0,15	0,6	1,20	50	1,2
25	02/02/2017	11,3	22,5	11,0	0,4	-	-	0,00	0,0	0,00	0	0,0
26	03/02/2017	16,0	43,5	24,5	0,3	0,7	0,5	0,12	0,5	0,78	32	0,8

FONTE: O autor (2017)

LEGENDA: P é a precipitação total do evento. I₁₀ é a intensidade máxima em 10 minutos. I₃₀ é a intensidade máxima em 30 minutos. Qi é a vazão inicial do evento. Qpico é a vazão de pico do evento. Ro é o escoamento superficial. Vo é volume de escoamento superficial. Ac é a área de contribuição do escoamento.

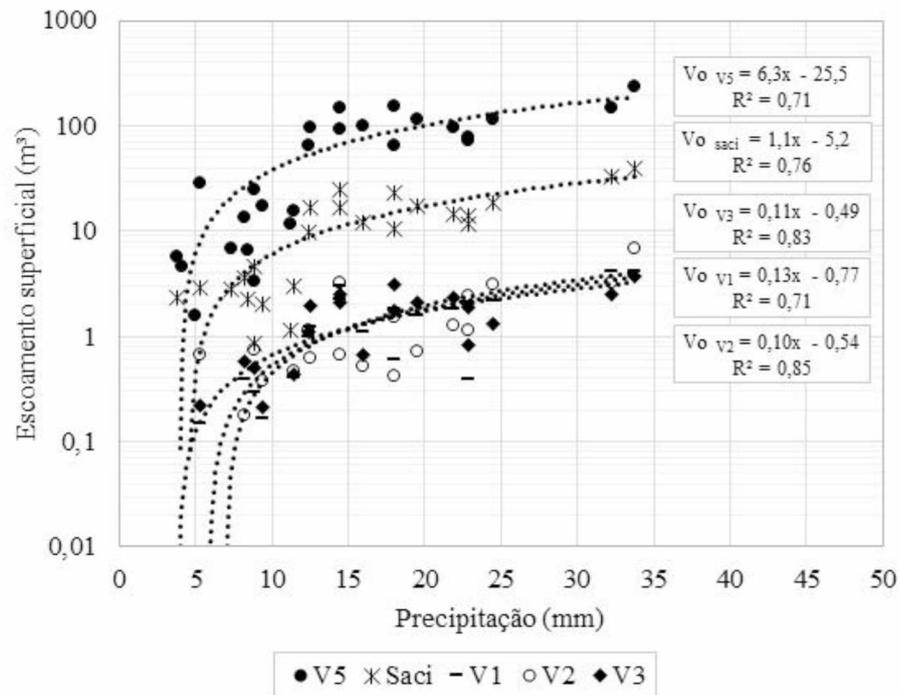
TABELA 16 - CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO E ESCOAMENTO NOS EVENTOS NA BACIA V3

N	Data	Precipitação			Escoamento							
		P (mm)	I ₁₀ (mm/h)	I ₃₀ (mm/h)	Qi (L s ⁻¹)	Qpico (L s ⁻¹)	Tpico (h)	Ro (mm)	Vo (m ³)	Ro/P (%)	Ac (m ²)	Ac (%)
1	11/25/2016	7,4	12,2	8,6	0,24	-	-	0,00	0,0	-	0	-
2	11/27/2016	22,9	74,7	38,6	0,22	1,2	0,3	0,07	1,9	0,32	84	2,0
3	11/28/2016	21,8	50,3	34,5	0,20	0,7	0,3	0,09	2,3	0,40	107	2,6
4	11/29/2016	14,5	12,2	9,1	0,22	0,4	0,5	0,08	2,1	0,54	144	3,5
5	12/3/2016	32,3	30,5	25,9	0,28	1,0	0,4	0,10	2,5	0,30	79	1,9
6	12/8/2016	8,4	13,7	8,1	0,30	-	-	0,00	0,0	-	0	0,0
7	12/9/2016	11,4	10,7	6,6	0,30	0,4	0,8	0,02	0,4	0,14	38	0,9
8	12/10/2016	12,4	6,1	6,1	0,30	0,5	0,4	0,04	1,1	0,33	89	2,1
9	12/13/2016	3,8	15,2	6,1	0,28	-	0,2	0,00	0,0	0,00	0	0,0
10	12/18/2016	8,9	25,9	13,2	0,22	0,4	0,2	0,02	0,5	0,22	57	1,4
11	12/20/2016	9,4	13,7	10,2	0,22	0,3	0,6	0,01	0,2	0,08	22	0,5
12	12/21/2016	4,1	3,0	2,0	0,22	-	-	0,00	0,0	-	0	0,00
13	12/27/2016	8,9	21,3	13,2	0,2	-	-	0,00	0,0	-	0	0,0
14	12/31/2016	22,8	53,3	29,5	0,1	0,5	0,3	0,03	0,8	0,14	36	0,9
15	1/1/2017	5,3	25,5	10,5	0,1	0,3	0,2	0,01	0,2	0,16	42	1,0
16	1/5/2017	24,5	13,5	9,0	0,2	0,3	0,2	0,05	1,3	0,20	53	1,3
17	1/6/2017	14,5	16,5	14,0	0,1	0,4	0,5	0,09	2,5	0,64	170	4,1
18	1/11/2017	33,8	84,0	50,5	0,2	1,4	0,3	0,28	7,4	0,83	108	5,3
19	1/22/2017	5,0	12,0	8,0	0,2	-	-	0,00	0,0	0,00	0	0,0
20	1/23/2017	8,3	19,5	15,5	0,1	0,3	0,5	0,02	0,6	0,26	69	1,7
21	1/24/2017	18,0	54,0	35,5	0,1	0,7	0,5	0,07	1,8	0,37	99	2,4
22	1/25/2017	19,5	39,0	21,5	0,2	0,9	0,5	0,08	2,1	0,41	108	2,6
23	1/25/2017	18,0	42,0	30,5	0,2	1,0	0,5	0,14	3,6	0,75	172	4,8
24	1/26/2017	12,5	39,0	23,5	0,1	0,7	0,5	0,07	2,0	0,60	158	3,8
25	2/2/2017	11,3	22,5	11,0	0,1	-	-	0,00	0,0	-	0	0,0
26	2/3/2017	16,0	43,5	24,5	0,1	0,4	0,5	0,03	0,7	0,16	42	1,0

FONTE: O autor (2017)

LEGENDA: P é a precipitação total do evento. I₁₀ é a intensidade máxima em 10 minutos. I₃₀ é a intensidade máxima em 30 minutos. Qi é a vazão inicial do evento. Qpico é a vazão de pico do evento. Ro é o escoamento superficial. Vo é volume de escoamento superficial. Ac é a área de contribuição do escoamento.

FIGURA 31 – RELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E ESCOAMENTO SUPERFICIAL PARA AS BACIAS MONITORADAS



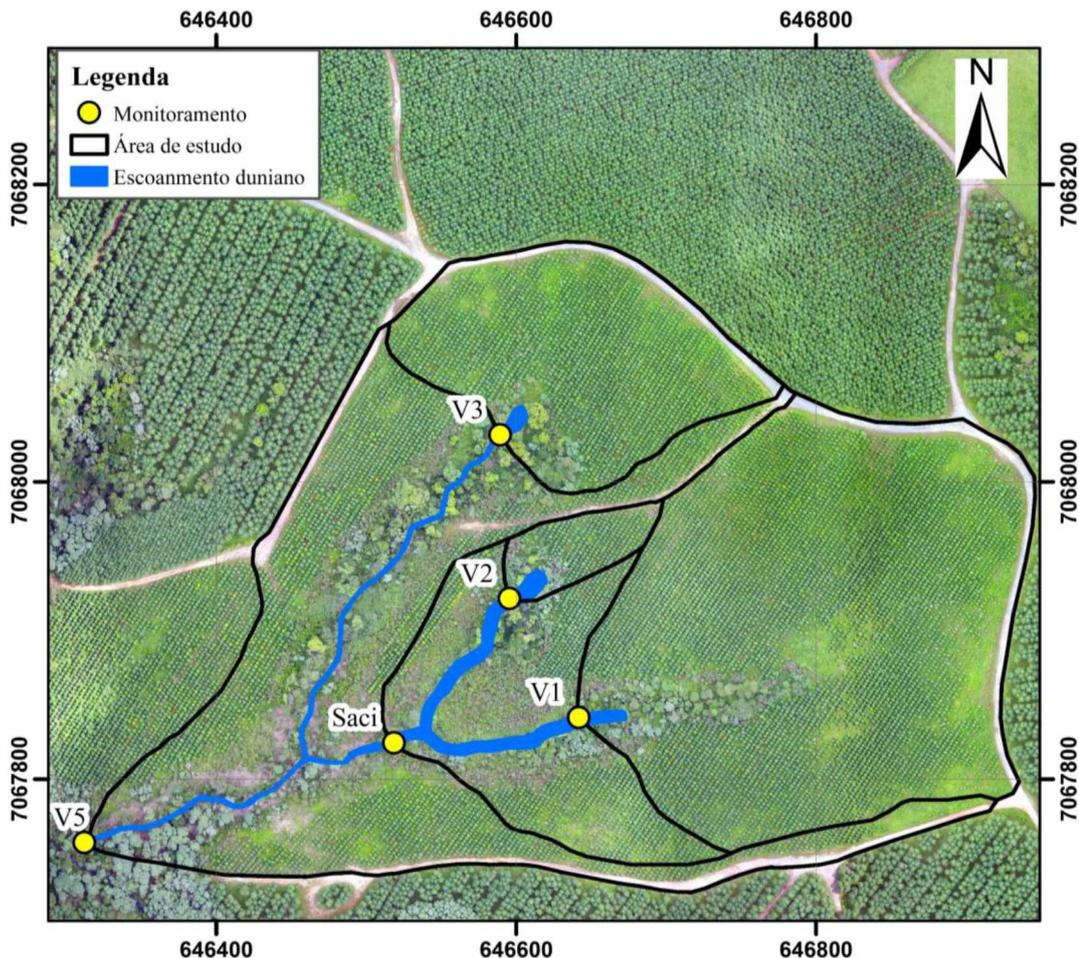
FONTE: O autor (2017)

A distribuição espacial das áreas saturadas próximas aos canais de drenagem é apresentada na Figura 32. A área total dentro da área de estudo é de 3150 m², sendo 213 m² na bacia V1, 278 m² na V2, 186 m² na V3 e 2433 m² na Saci. Nessas áreas ocorre a geração de escoamento por saturação ou escoamento duniano, que é produzido pela precipitação sobre a área saturada e pela contribuição do escoamento resultante da elevação do nível freático que aflora e escoam pela superfície (HORNBERGER et al., 1998). As áreas de contribuição de escoamento superficial (A_c) calculadas para os eventos não superou a área saturada nas bacias V1, V2, V3 e Saci. Dessa forma, pode-se afirmar que nos 26 eventos ocorreu exclusivamente escoamento duniano, gerado na área saturada localizada na zona ripária, não havendo contribuição de escoamento superficial em vertentes ou conexão do escoamento das estradas dentro da área de drenagem dessas sub-bacias. Para as bacias V1, V2 e V3 os tamanhos das áreas saturadas e a ocorrência de escoamento duniano limitado a essas áreas explica os valores de geração de escoamento semelhantes observado nos eventos nessas bacias (FIGURA 31) apesar da considerável diferença nas áreas totais de drenagem.

A constatação de que a geração de escoamento superficial que contribui até o exutório das bacias Saci e V3 é proveniente apenas da área saturada próxima ao canal de drenagem é

consistente com o estudo anteriormente realizado na mesma área (bacia Saci) por Santos (2009). Na FIGURA 33 é apresentada a relação entre precipitação e escoamento superficial na bacia do rio Saci, utilizando os dados dos 26 eventos monitorados (TABELA 13) e 20 eventos monitorados por Santos (2009) sendo 14 deles com escoamento proveniente exclusivamente da zona saturada no entorno dos canais e 6 com contribuição adicional de escoamento proveniente de uma segunda área saturada localizada em encostas a montante da estação V1. Para a bacia do rio Saci os eventos com essa característica apresentam escoamento superficial total de até 100 m^3 com precipitação inferior a 50 mm . Nos eventos em que o escoamento superficial é resultante da soma da contribuição da área saturada no entorno dos canais e da segunda área saturada na encosta, observa-se que a conexão dessa segunda área causa uma mudança na relação entre precipitação e escoamento, com maior coeficiente de escoamento, que os diferencia claramente dos eventos com contribuição de escoamento gerado somente na área saturada no entorno dos canais.

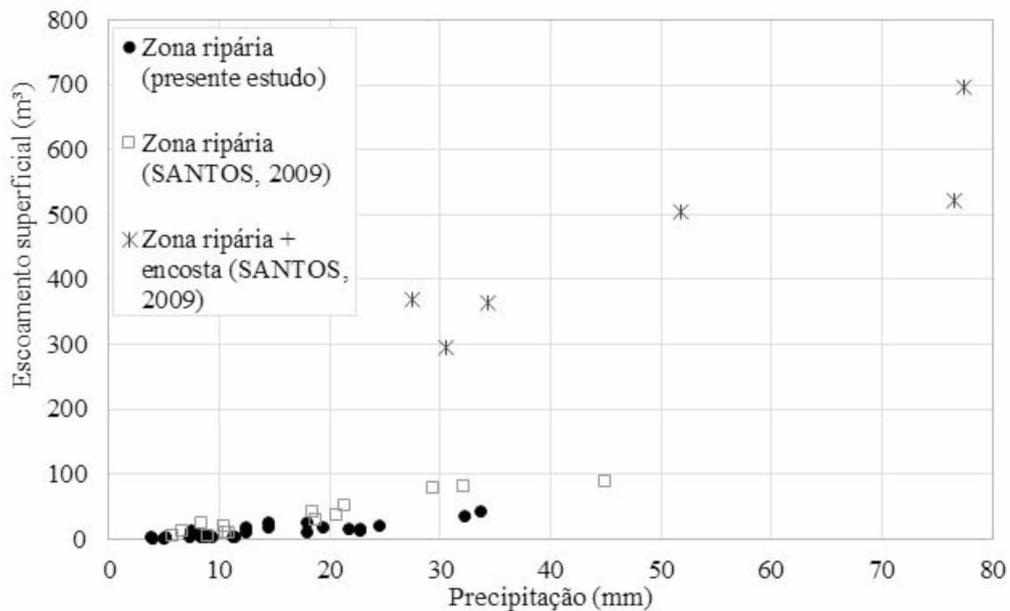
FIGURA 32 – ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO DO ESCOAMENTO DUNIANO



FONTE: O autor (2017)

Pode-se observar na FIGURA 33 que todos os eventos registrados na estação Saci que ocorreram no período considerado no presente trabalho apresentaram valores compatíveis com eventos nos quais a geração de escoamento superficial é limitada às áreas próximas aos canais. A partir dessa análise e da observação das áreas de contribuição dos eventos pode-se concluir que não houve conectividade do escoamento das encostas, para as bacias V1, V2, V3 e Saci, nem das estradas não pavimentadas presentes nas áreas de drenagem das bacias V1, V3 e Saci.

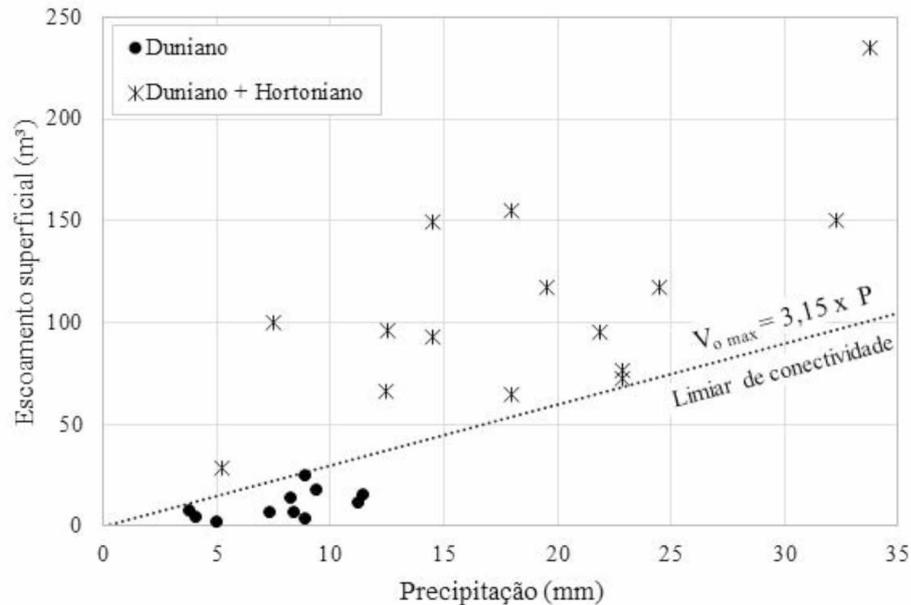
FIGURA 33 – RELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA BACIA DO RIO SACI



FONTE: O autor (2017)

Na bacia V5 ocorreram 15 eventos em que A_c foi superior a 3150 m^2 , indicando que houve contribuição de escoamento superficial gerado em áreas além da zona saturada. Considerando que, para as áreas a montante das estações V3 e Saci não foi identificada conexão de escoamento gerados em áreas externas à zona saturada, provenientes de encostas ou estradas, as áreas que geraram o escoamento e efetivamente contribuíram nesses 15 eventos, se conectam aos canais na área incremental de drenagem, localizada a jusante das estações V3 e Saci. Considerando a presença de estradas na área incremental da bacia V5 e o grande potencial de geração de escoamento hortoniano, devido à baixa capacidade de infiltração, foi definido que ao se observar A_c superior a área da zona saturada, ocorre a contribuição de escoamento superficial proveniente de estradas.

FIGURA 34 - RELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA BACIA V5



FONTE: O autor (2017)

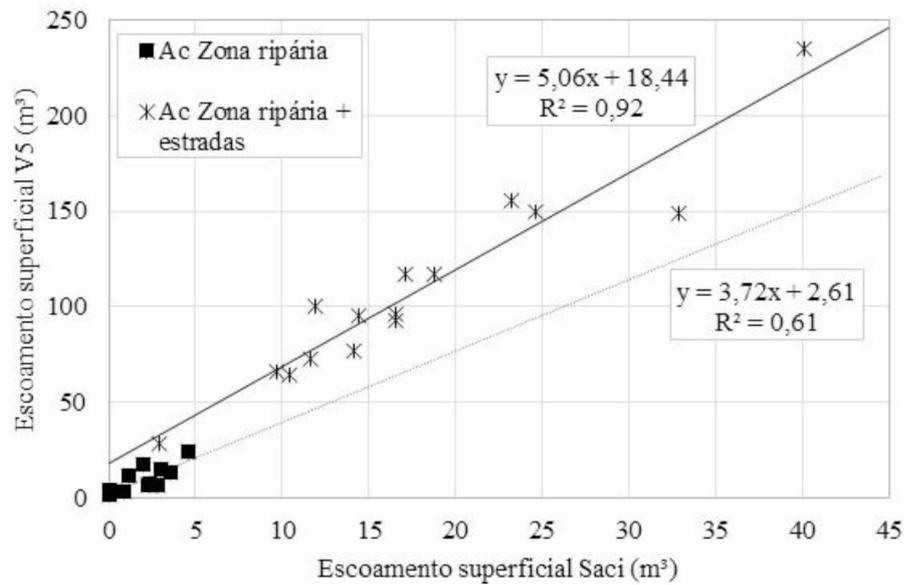
Na FIGURA 34 é apresentada a relação entre precipitação e escoamento superficial para a bacia V5, diferenciando os eventos em que houve exclusivamente geração de escoamento duniano e aqueles em que houve a conectividade do escoamento hortoniano gerado nas estradas. O limiar de conectividade, definido pelo tamanho das áreas saturadas da zona ripária (3150 m²), evidencia a diferença entre eventos com geração de escoamento na área saturada (duniano) e aqueles em que ocorre a conectividade das estradas não pavimentadas (duniano + hortoniano).

Os eventos se diferenciam, de maneira menos abrupta do que os observados na bacia do rio Saci por Santos (2009), em que a segunda fonte de contribuição de escoamento é ativada em eventos extremos e se observa um salto de aproximadamente 200 m³ (FIGURA 33). Na bacia V5 o volume máximo de escoamento que pode ser produzido na zona saturada ($V_{o\ max}$) é superado em todos os eventos com precipitação superior a 11,5 mm e em eventos de pouca precipitação, entre 5 e 10 mm, sendo, no entanto, um intervalo de precipitação em que predomina a geração de escoamento duniano. Isso demonstra que a conectividade hidrológica das estradas ocorre com frequência na área a jusante das estações Saci e V3.

Quando comparados os volumes de escoamento superficial nas bacias Saci e V5 (FIGURA 35) evidencia-se a mudança de tendência para os eventos em que ocorre a conectividade hidrológica das estradas. Em eventos em que não ocorre a conexão de escoamento hortoniano a bacia V5 apresenta escoamento superficial aproximadamente 3,7

vezes maior que o observado na bacia Saci, enquanto nos eventos com contribuição das estradas, o escoamento é aproximadamente 5 vezes superior.

FIGURA 35 – RELAÇÃO ENTRE ESCOAMENTO SUPERFICIAL NAS BACIAS SACI E V5 PARA ESCOAMENTO PROVENIENTE DA ZONA RIPÁRIA E COM CONTRIBUIÇÃO DE ESTRADAS



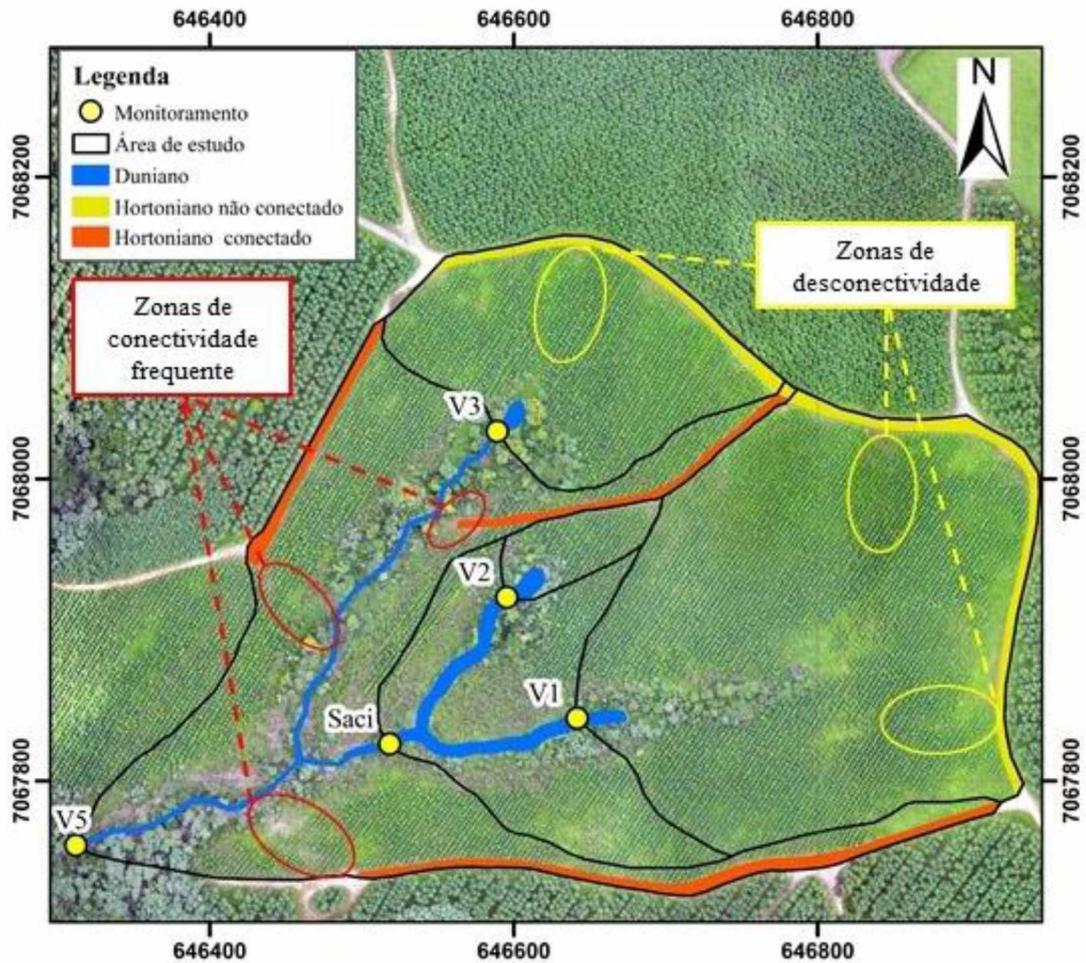
FONTE: O autor (2017)

A FIGURA 36 mostra as áreas de geração de escoamento superficial e a conectividade com os canais de drenagem. A área de geração de escoamento duniano é frequentemente ativa e conectada na área de estudo. Destaca-se que a área representada na figura corresponde a área máxima de expansão, tendo sido observado nos eventos variação no tamanho da área (A_c) e eventos com ausência de escoamento superficial. Esse comportamento é o mesmo descrito por Dunne e Black (1970) que definiram a área variável de afluência condicionada às variações do tamanho e da contribuição de escoamento vindo de áreas saturadas.

Em relação às estradas, o processo que domina é a geração de escoamento superficial hortoniano. Em uma parcela de estrada não pavimentada, localizada próxima a área de estudo, Schultz (2013) observou valores altos de coeficientes de escoamento, em média 70 %, mesmo para eventos com precipitação entre 6 e 13 mm. Na bacia V5, foram observados eventos com precipitação de até 11,43 mm em que não ocorreu contribuição de escoamento superficial das estradas. A baixa capacidade de infiltração observada nas estradas permite concluir que na maioria dos eventos de precipitação, se não em todos, ocorre a geração de escoamento hortoniano nas estradas. No entanto, esse escoamento nem sempre se conecta aos canais de

drenagem. A conexão só ocorre quando o volume de escoamento gerado supera a capacidade de infiltração das vertentes que separam os locais de saída de escoamento das estradas e os canais de drenagem (HAIRSINE et al., 2002; TAKKEN et al., 2008).

FIGURA 36 – CONECTIVIDADE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL



FONTE: O autor (2017)

Na FIGURA 36, estão identificadas zonas de conectividade/desconectividade que atuam como limitantes na transferência do escoamento entre os locais em que a drenagem da estrada é direcionada para as vertentes e os canais de drenagem. A localização dessas zonas foi definida pela presença de estruturas que permitem a passagem do escoamento da estrada para a encosta e pela característica de convergência topográfica da encosta indicam a direção do escoamento. A condição de conectividade/desconectividade foi definida com base na análise dos eventos que possibilita afirmar que as estradas que drenam em direção aos canais de drenagem a jusante

das estações V3 e Saci tem na porção de encosta uma condição de conectividade frequente e tem sua extensão do local de entrada do escoamento até o canal, enquanto as estradas que tem seu escoamento direcionado para as nascentes V1 e V3 apresentaram desconectividade, não tendo sido observada sua influência no escoamento superficial dessas nascentes.

FIGURA 37 – ÁREAS DE TRANSFERÊNCIA DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL DE ESTRADAS PARA ENCOSTAS.



FONTE: O autor (2017)

LEGENDA: a) Estrada a montante da bacia V1. b) Localizada entre as bacias V2 e V3. c) Estrada que contribui com escoamento a jusante da bacia V3. d) Estrada que contribui com escoamento entre as estações Saci e V5.

Ao comparar as porções das estradas hidrológicamente conectadas e as não conectadas percebe-se diferenças morfológicas e locais que condicionam a conectividade. Nas estradas que drenam em direção aos canais das bacias V1 e V3, nas quais não ocorreu a efetiva contribuição de escoamento, as distâncias entre os dispositivos de drenagem que direcionam o escoamento da estrada para as encostas e os canais de drenagem são maiores do que as distâncias das estradas que contribuem com escoamento. Além disso, as estradas não conectadas hidrológicamente tem sua extensão perpendicular ao caminho do escoamento em direção aos canais. Dessa forma o escoamento superficial direcionado para as encostas por essas

estradas apresenta menores velocidades e não ocorre de forma concentrada (FIGURA 37). Em experimento realizado em estradas de uso florestal Croke et al. (2005) verificaram que a distância e a forma do caminho percorrido pelo escoamento, concentrado ao longo de ravinas ou disperso na vertente, são determinantes para a ocorrência da conexão do escoamento. Nesse sentido, a localização da estrada na área de drenagem e das estruturas que direcionam o escoamento para a encosta são determinantes na ocorrência da conectividade.

Essas características fixas, definidas pela forma e distribuição espacial das áreas de geração de escoamento são as componentes estruturais da conectividade (LEXARTZA-ARTZA; WAINWRIGHT, 2009), definindo a recorrência da resposta hidrológica ao longo de eventos distintos. A resposta hidrológica local, que ocorre no caso da geração de escoamento superficial nas estradas, pode não se converter em uma resposta no exutório da área monitorada que está condicionada à conectividade hidrológica entre a área de geração de escoamento e os canais de drenagem. Esse escoamento não conectado define, o que pode ser chamado de área ativa de geração de escoamento, não sendo, no entanto, necessariamente uma área de contribuição de escoamento (AMBROISE, 2004).

4.2.1.2. Conectividade do transporte de sedimentos

As características do transporte de sedimentos nos eventos observados nas bacias V5 e Saci são apresentados na TABELA 17. Na estação Saci a concentração de sedimentos em suspensão máxima observada variou entre 4,8 no evento 7 e 86,5 mg L⁻¹ no evento 18 e a produção total de sedimentos variou entre 0,06 kg no evento 11 e 1,9 kg evento 18. O tempo de pico de concentração de sedimentos em relação ao momento de maior intensidade da chuva apresentou valores baixos ocorrendo no mesmo momento nos eventos 16 e de 20 a 25, e anterior ao pico de precipitação do evento 17.

Todos os eventos da bacia Saci apresentaram comportamento de histerese entre vazão e concentração de sedimentos em suspensão em formato de laço horário, ou seja, o pico de concentração de sedimentos foi observado sempre antes do pico de vazão, seguido de rápido decréscimo, como exemplificado na FIGURA 38. O laço de histerese em sentido horário é característico de bacias em que os sedimentos são transportados a partir de áreas próximas aos canais de drenagem ou mobilizados no próprio canal (JANSSON, 2002; SEEGER et al., 2004). Esse comportamento é consistente com a geração de escoamento superficial limitada à zona

ripária, não propiciando aporte de sedimentos das vertentes ou estradas. Assim, os sedimentos transportados durante o evento são mobilizados a partir de áreas de contribuição limitadas.

TABELA 17 - CARACTERÍSTICAS DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NOS EVENTOS DAS BACIAS V5 E SACI

N	Data	Saci ¹						V5					
		Css med (mg L ⁻¹)	Css max (mg L ⁻¹)	Qs max (g s ⁻¹)	T _{pico} Css (h)	Sed. total (kg)	Hist.	Css med (mg L ⁻¹)	Css max (mg L ⁻¹)	Qs max (g s ⁻¹)	T _{pico} Css (h)	Sed. total (kg)	Hist.
1	25/11/2016	4,5	19,4	0,04	0,33	0,13	H	28	112	0,3	0,33	1,4	H
2	27/11/2016	16,4	74,1	0,27	0,33	0,63	H	1557	6020	114	0,83	238	AH
3	28/11/2016	11,3	40,9	0,09	0,17	0,43	H	1439	6020	151	0,67	387	AH
4	29/11/2016	4,2	8,9	0,02	0,17	0,28	H	454	2898	35	0,83	130	L
5	03/12/2016	6,5	29,6	0,15	0,42	0,83	H	674	6020	210	0,42	378	AH
6	08/12/2016	2,1	14,1	0,03	0,17	0,09	H	26	59	0,2	0,33	2,5	H
7	09/12/2016	2,0	4,8	0,01	0,33	0,07	H	189	1114	8	1,17	19	AH
8	10/12/2016	2,0	5,8	0,02	0,25	0,15	H	197	2020	21	0,58	66	L
9	13/12/2016	3,9	20,1	0,04	0,17	0,13	H	133	1287	5	0,83	10	AH
10	18/12/2016	4,6	19,3	0,04	0,33	0,13	H	1040	6020	42	0,83	87	AH
11	20/12/2016	3,2	8,2	0,01	0,25	0,06	H	864	5100	38	0,92	67	AH
12	21/12/2016	-	-	-	-	-	-	31	107	0,3	1,00	2,9	H
13	27/12/2016	7,1	14,1	0,02	0,50	0,08	H	28	54	0,1	0,00	0,8	H
14	31/12/2016	6,3	63,0	0,10	0,17	0,35	H	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
15	01/01/2017	9,0	27,9	0,04	0,17	0,10	H	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
16	05/01/2017	5,8	23,0	0,03	0,00	0,39	H	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
17	06/01/2017	4,6	37,6	0,06	-1,30	0,38	H	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
18	11/01/2017	15,9	86,5	0,80	0,33	1,90	H	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
19	22/01/2017	-	-	-	-	-	-	19	31	0,09	0,33	1,1	H
20	23/01/2017	6,2	27,8	0,04	0,00	0,10	H	344	3318	16	1,00	25	AH
21	24/01/2017	13,7	65,6	0,13	0,00	0,36	H	1596	6020	105	0,67	215	AH
22	25/01/2017	7,3	43,9	0,12	0,00	0,49	H	1319	6020	194	0,17	528	AH
23	25/01/2017	5,9	27,5	0,14	0,00	0,48	H	533	6005	226	0,17	463	L
24	26/01/2017	7,1	49,3	0,10	0,00	0,35	H	813	6017	131	0,50	296	AH
25	02/02/2017	1,3	9,6	0,01	0,00	0,06	H	364	5971	36	0,67	65	AH
26	03/02/2017	9,3	46,3	0,12	0,33	0,34	H	897	6020	180	0,83	405	L

FONTE: O autor (2017)

LEGENDA: Css med é a média da concentração de sedimentos no evento. Css max é a concentração máxima de sedimentos no evento. Qs max transporte de sedimentos máximo do evento. Sed. Total é a produção de sedimentos do evento. Hist é a forma da histerese. H histerese em sentido horário. AH histerese em sentido anti-horário. L variação de Q e Css alinhados sem presença de histerese. n.r. indica que a variável não foi registrada por falha no monitoramento.

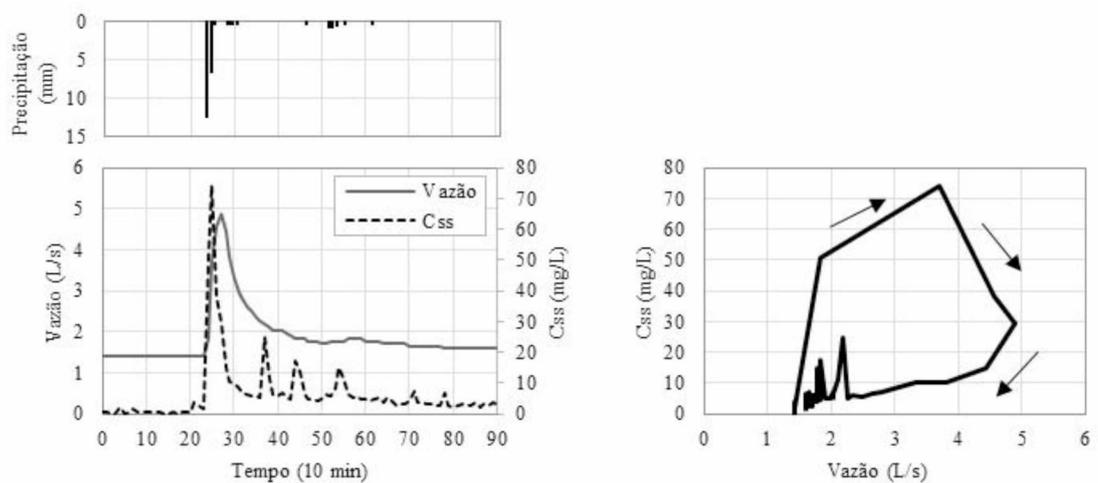
NOTA: ¹ Nos eventos 12 e 19 não houve geração de escoamento superficial na bacia Saci

Apesar do escoamento superficial ser gerado na zona ripária e a forma da histerese indicar que os sedimentos sejam produzidos em áreas próximas ao canal, não há boa correlação

entre vazão e concentração de sedimentos ($R^2=0,23$), sendo observada grande dispersão (FIGURA 39), com concentrações de sedimentos variando em até três ordens de grandeza para uma mesma vazão. Essa dispersão é comumente observada em pequenas bacias com forte efeito de histerese e demonstram a influência de fatores relacionados a características da precipitação e da geração de escoamento ao longo da bacia (SADEGHI et al., 2008; EDER et al., 2010). Na relação entre vazão e concentração de sedimentos da bacia do rio Saci para as vazões maiores que 2 L s^{-1} é observado um limite inferior bem definido. Nessas condições a velocidade do escoamento é suficiente para causar o movimento das partículas, evidenciando que, para vazões maiores que 2 L s^{-1} os valores mínimos de concentração de sedimentos em suspensão tendem a aumentar em função da vazão.

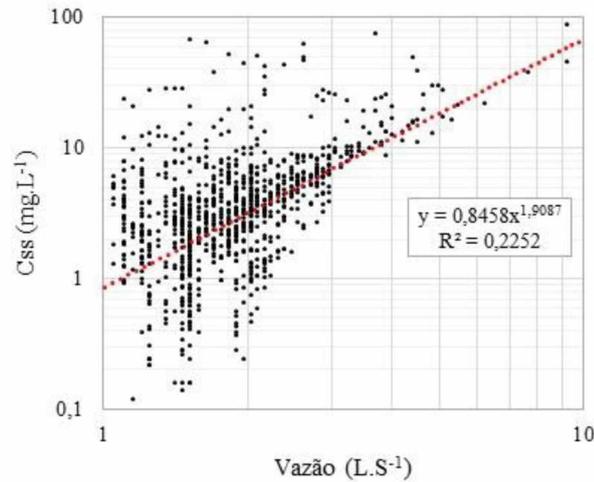
Na bacia Saci é observada correlação positiva entre a intensidade máxima da precipitação (I_{10}) e a concentração máxima de sedimentos observada nos eventos (FIGURA 40). A existência dessa correlação, juntamente com o fato de o pico de concentração de sedimentos ocorrer em tempo próximo ou simultâneo ao pico de precipitação e a forma da histerese em sentido horário, mostram a importância da erosão por salpicamento (*splash*), na disponibilização de sedimentos, na fase inicial dos eventos cessando antes de ser atingido o pico de vazão, quando os sedimentos são transportados pelo escoamento (SAMMORI et al., 2004; SADEGHI et al., 2008).

FIGURA 38 - EXEMPLO DE EVENTO OBSERVADO NA BACIA SACI (EVENTO 2)



FONTE: O autor (2017)

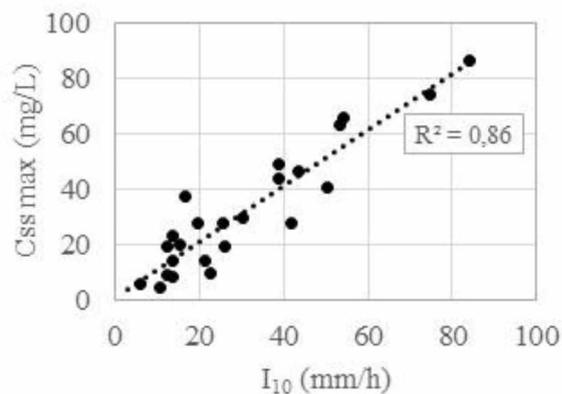
FIGURA 39 – RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO PARA OS EVENTOS OBSERVADOS NA BACIA SACI



FONTE: O autor (2017)

Em estudo da produção de sedimentos em uma bacia florestada em eventos de precipitação, Sammori et al. (2004) observaram a dependência da disponibilização de sedimentos pela erosão ou mobilização pelo efeito de impacto das gotas da chuva combinados com a ocorrência de escoamento proveniente de áreas saturadas na histerese em sentido horário. Sammori et al. (2004) observaram que o aumento da vazão contribui para a redução do efeito erosivo da chuva devido ao aumento da altura da lâmina de escoamento que cobre a superfície das margens e depósitos de sedimentos. A partir do momento em que ocorre a ascensão do escoamento, ocorre o transporte do material disponível no canal.

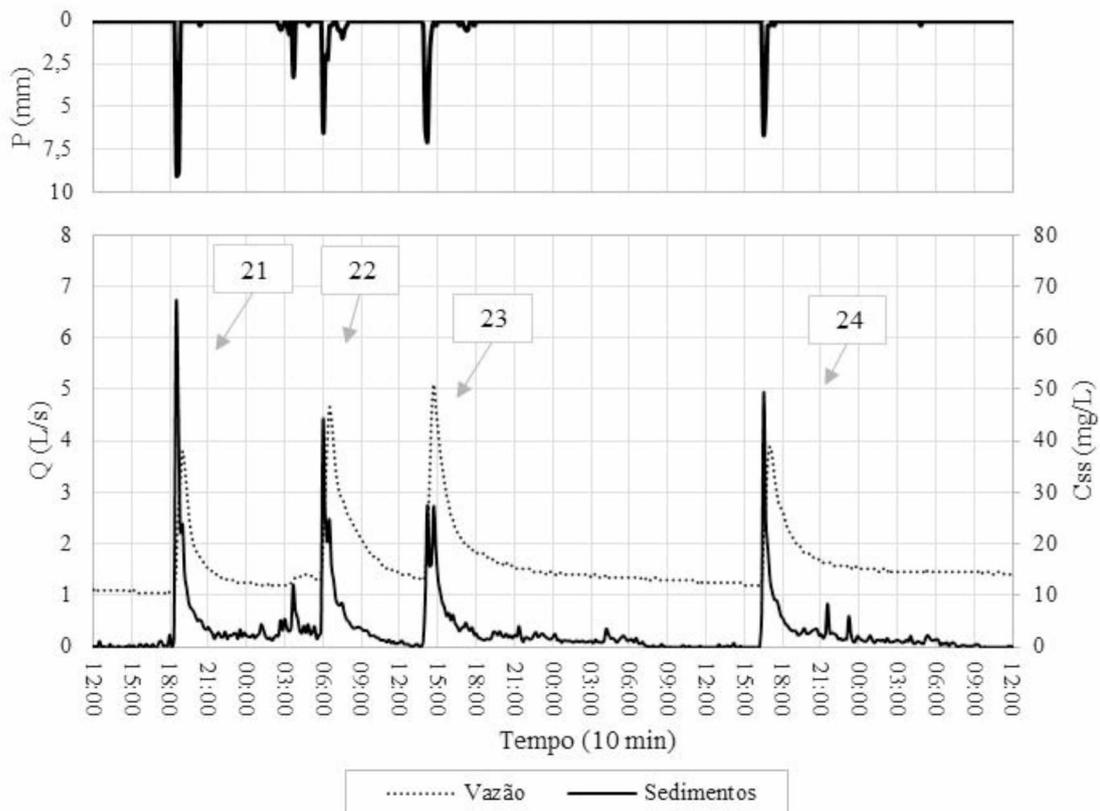
FIGURA 40 – RELAÇÃO ENTRE INTENSIDADE DA PRECIPITAÇÃO (I_{10}) E CONCENTRAÇÃO MÁXIMA DE SEDIMENTOS DOS EVENTOS OBSERVADOS NA ESTAÇÃO SACI



FONTE: O autor (2017)

A FIGURA 41 mostra parte da série observada com eventos consecutivos. Observa-se nos três primeiros eventos (21, 22 e 23) uma redução progressiva dos picos de concentração de sedimentos, observados antes dos picos de vazão, enquanto os picos de vazão aumentaram do primeiro para o terceiro evento. Nesses três eventos, não há correspondência entre o pico de concentração e a precipitação. Após a ocorrência do pico de vazão desses três eventos, a vazão de base retorna a valores semelhantes, não podendo ser considerado efeito de diluição da concentração de sedimentos pela contribuição de escoamento de base, como observado por Walling e Webb (1982). Dessa forma, a redução dos picos de concentração de sedimentos ocorre pela diminuição da disponibilidade do material depositado no canal. Isso mostra a ocorrência de uma exaustão do suprimento local de sedimentos. A re-suspensão de sedimentos depositados no canal e a redução da disponibilidade de sedimentos finos ao longo de eventos consecutivos é frequentemente observada em bacias florestadas (SADEGHI, 2008; GELLIS, 2013).

FIGURA 41 – SÉRIE DE VAZÃO E CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS DA BACIA SACI EM SEQUÊNCIA DE EVENTOS EVIDENCIANDO REDUÇÃO DO SUPRIMENTO DE SEDIMENTOS



FONTE: O autor (2017)

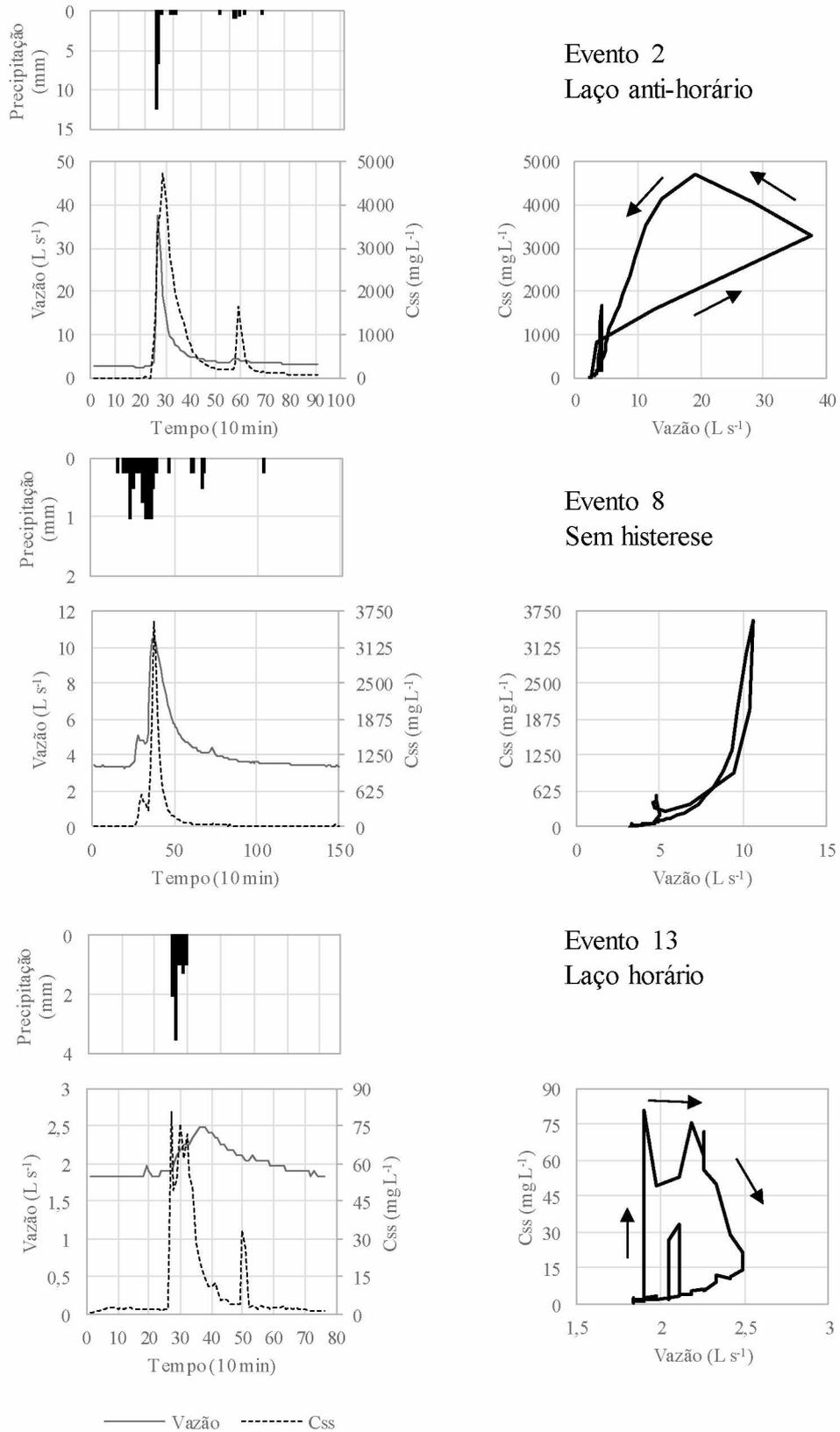
Após um período de 24 horas sem precipitação, o quarto evento apresenta pico de concentração de sedimentos maior do que o observado nos dois eventos anteriores. Ao longo do período de recessão ocorre deposição de sedimentos no canal que permitem seu posterior transporte no evento seguinte. A extensão desse período entre eventos (*recovery period*), define o grau de recuperação da disponibilidade de sedimentos, reduzindo assim o efeito de eventos anteriores (WALLING; WEBB, 1982; GELLIS, 2013).

Na estação V5 a concentração máxima observada nos eventos variou entre 31 e 6020 mg L⁻¹. A concentração máxima detectável pelo sensor foi atingida no pico de concentração de vários eventos. O restante dos registros permite a descrição detalhada das variações da concentração de sedimentos. Devido à problemas na operação do turbidímetro, os eventos que ocorreram entre 31/12/2016 e 11/01/2017, correspondentes aos eventos 14 a 19 da TABELA 17, não possuem a série de concentração de sedimentos e não foram considerados nas análises.

A produção total de sedimentos nos eventos variou entre 0,8 kg no evento 13 a 528 kg no evento 22. Os eventos observados na estação V5 apresentaram mais de uma forma de curvas de histerese. Foram observados 5 eventos com histerese em sentido horário (H), 12 em sentido anti-horário (AH), além de 4 eventos em que não foi observada histerese (L). Exemplos do comportamento observado na estação V5 são apresentados na FIGURA 42.

Na bacia V5 o escoamento superficial dos eventos pode ser composto somente pelo escoamento duniano produzido na zona saturada ou por uma combinação deste com o escoamento superficial hortoniano gerado nas estradas (FIGURA 34). A variação no tipo da histerese observado nos eventos está relacionada a localização das fontes de sedimentos e condicionados pela conectividade do escoamento superficial. Na FIGURA 43 é mostrada a relação entre a área de contribuição de escoamento (A_c) e o tempo de pico da concentração de sedimentos (T_{pico} C_{ss}), destacando tipos de histerese observados e as fontes de escoamento superficial. Os eventos com área de contribuição inferiores a 3150 m² são aqueles em que o escoamento superficial é gerado exclusivamente nas áreas saturadas no entorno dos canais, na qual existe um limiar em 1250 m² em que eventos com área inferior não apresentaram escoamento superficial nas nascentes. Os eventos com área superior a 3150 m² são aqueles em que ocorre a conectividade hidrológica das estradas.

FIGURA 42 – EXEMPLO DE RELAÇÃO VAZÃO X CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS IDENTIFICADOS NA BACIA V5

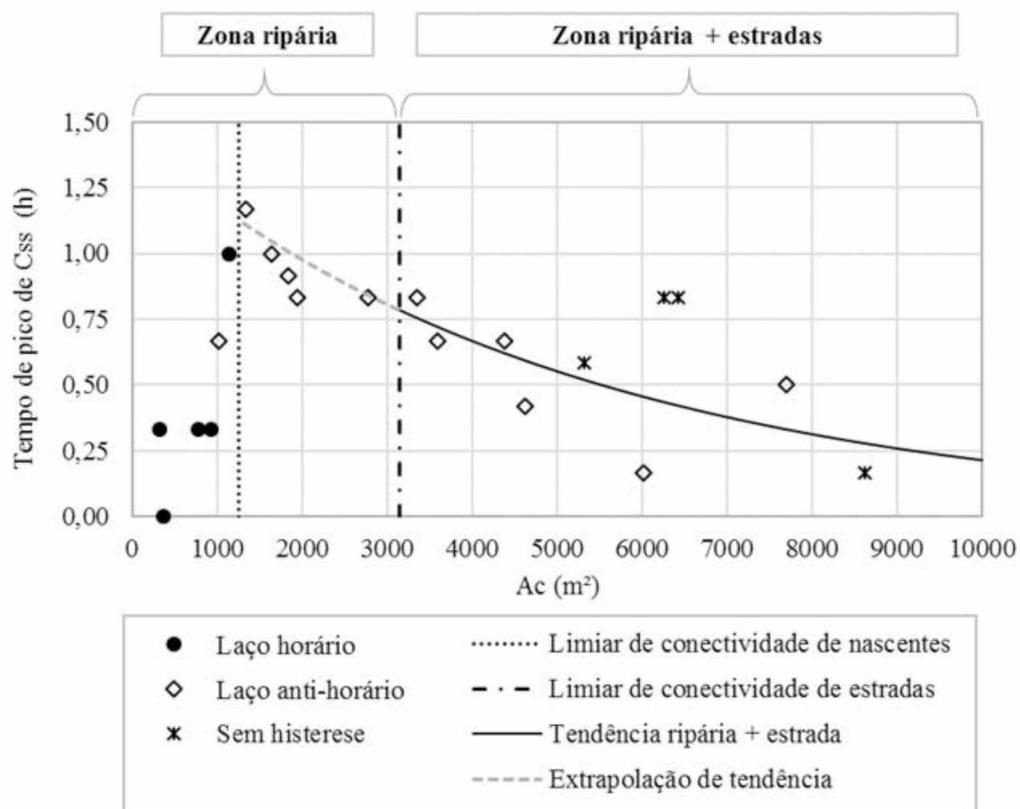


FONTE: O autor (2017)

É evidenciada na FIGURA 43 a variação do tipo de laço de histerese com o aumento da área de contribuição. Os eventos com maior área de contribuição apresentam tendência exponencial de redução no tempo de pico de concentração de sedimentos. O aumento da área de contribuição, ocorre pela conectividade de maiores volumes de escoamento hortoniano gerado nas estradas. A redução do tempo de pico de concentração de sedimentos mostra que os sedimentos produzidos nas estradas são transportados de forma mais eficiente quando maiores volumes de escoamento são conectados aos canais de drenagem.

A relação entre concentração de sedimentos em suspensão e vazão, nos eventos com contribuição de escoamento e sedimentos das estradas, apresenta histerese em sentido anti-horário (AH) e sem histerese (L). Nesses eventos foram observadas as maiores vazões e concentrações de sedimentos em suspensão (FIGURA 44a e b) que resultaram em eventos com as maiores produções totais sedimentos variando entre 66 e 528 kg.

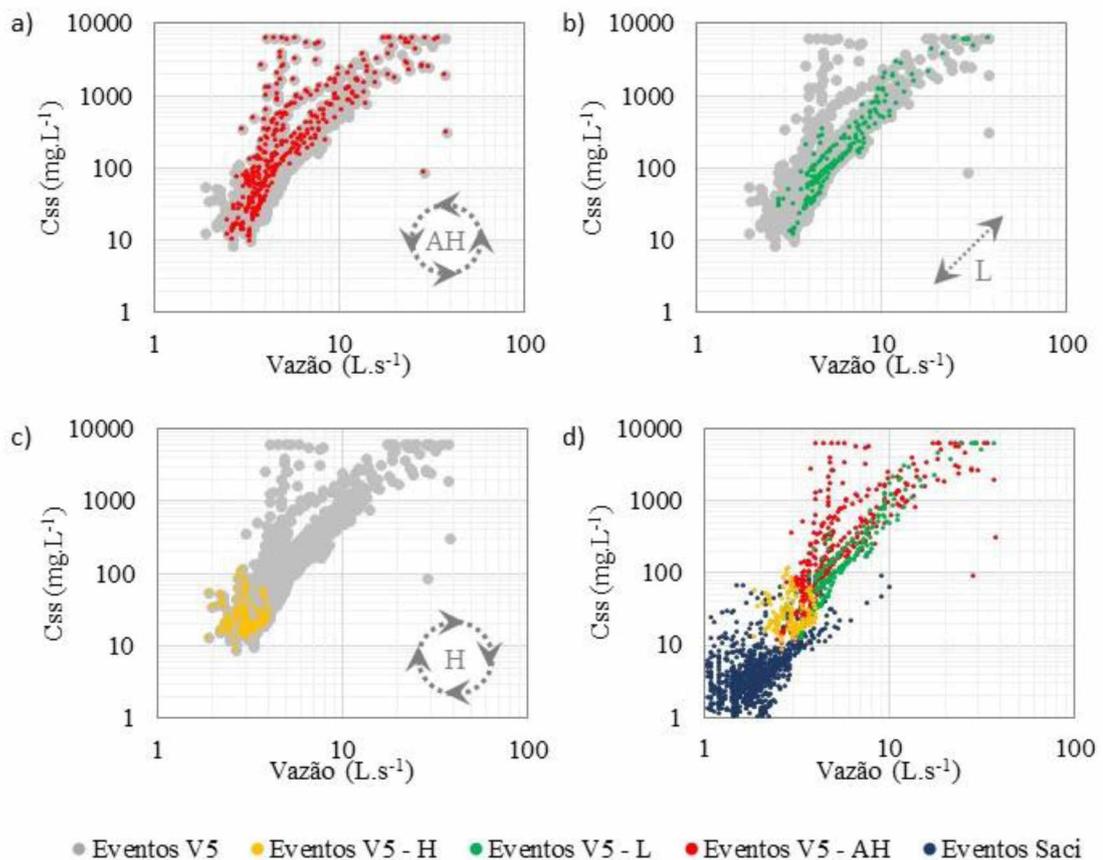
FIGURA 43 – RELAÇÃO ENTRE ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL (Ac) E TEMPO DE PICO DE CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO (CSS) NA BACIA V5



FONTE: O autor (2017)

A histerese em sentido anti-horário está relacionada à contribuição de sedimentos provenientes de áreas distantes do canal de drenagem (WILLIAMS, 1989). Observando a relação entre vazão e concentração de sedimentos, dos eventos com histerese anti-horária, em comparação com os demais eventos, atinge as maiores concentrações de sedimentos para vazões maiores que 2 L s^{-1} (FIGURA 44a).

FIGURA 44 – RELAÇÃO ENTRE VAZÃO E CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO



FONTE: O autor (2017)

LEGENDA: a) Eventos com histerese em sentido anti-horário na bacia V5. b) Eventos sem histerese na bacia V5. c) Eventos com histerese em sentido horário na bacia V5; d) Eventos nas bacias Saci e V5

Nos eventos sem histerese, a variação da concentração de sedimentos acompanha a variação da vazão nas fases de ascensão, pico e recessão. Esse comportamento ocorre quando há suprimento de sedimentos suficiente para que não haja exaustão ao longo do evento (WOOD, 1977; SHELLBERG et al., 2013). No período monitorado não ocorreram eventos consecutivos sem histerese, o que indica a dependência de sedimentos depositados em eventos anteriores ao longo do caminho percorrido pelo escoamento nas estradas, encostas, e no canal de drenagem.

Nos locais de conexão de escoamento entre estradas e canais de drenagem são observados sedimentos depositados que possibilitam suprimento de sedimentos nesse tipo de eventos.

Os eventos sem histerese não apresentaram característica de precipitação, escoamento ou concentração de sedimentos, que permitisse diferencia-los dos eventos com histerese em laço anti-horário, que possuem também contribuição de escoamento produzidos em estradas. Constatação semelhante foi feita por Rodríguez-Blanco et al. (2010), que em uma bacia hidrográfica com predomínio de cobertura florestal, observaram variação do tipo de histerese (AH e L), sem que houvesse, no entanto, diferença nas quantidades de precipitação, escoamento e sedimentos.

Nos eventos em que não houve conexão do escoamento superficial gerado nas estradas a relação entre vazão e concentração de sedimentos em suspensão apresentou histerese em sentido horário e anti-horário (FIGURA 43). Entre esses eventos foi identificado um limite na área de contribuição (A_c) de 1250 m². Na primeira porção estão eventos em que não foi observado escoamento superficial nas bacias V1, V2 e V3 e predomina a histerese em sentido horário. Na segunda porção, estão eventos com histerese em laço anti-horário, para os quais o tempo de pico de concentração sedimentos apresenta a mesma tendência de redução com A_c que foi observada nos eventos com contribuição de escoamento das estradas.

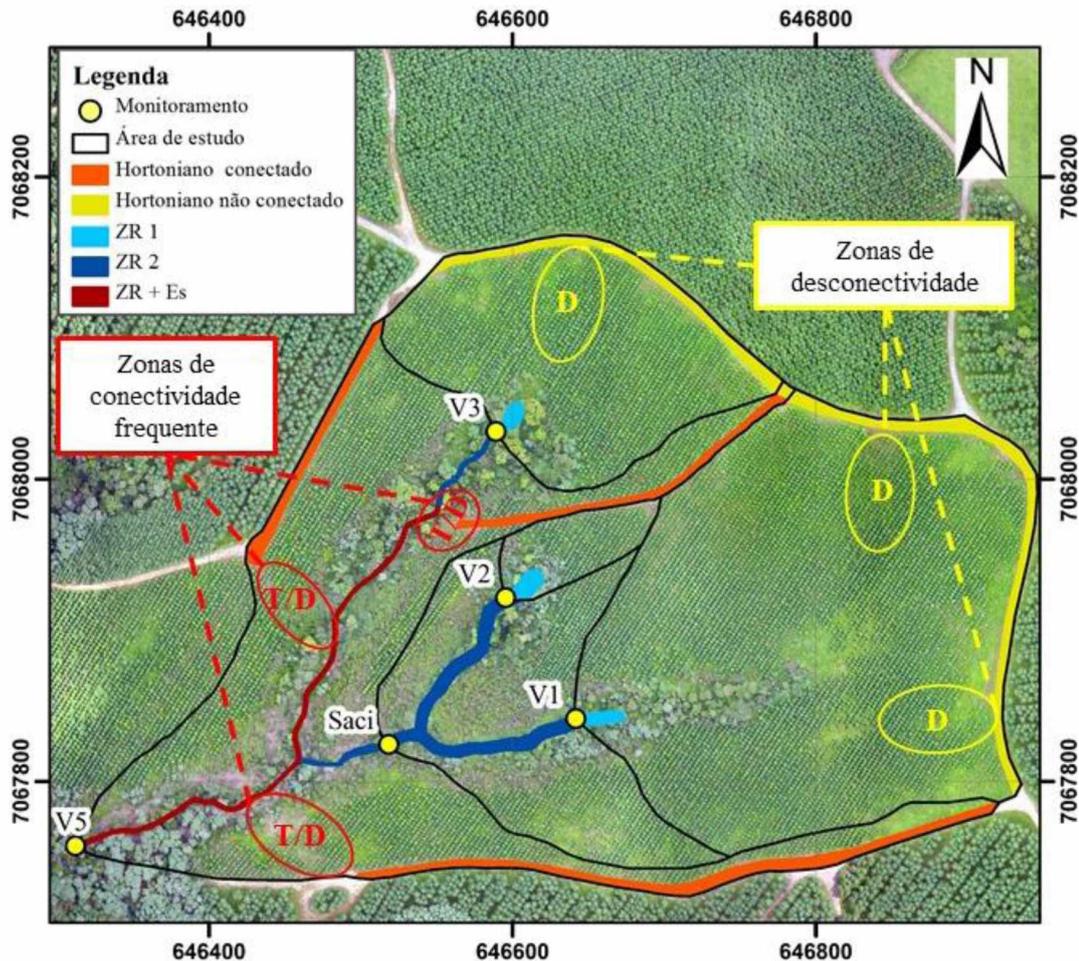
Os eventos com histerese em sentido horário são os de menor geração de escoamento, inferior a 7 m³, e de produção total de sedimentos, inferiores a 3 kg, sendo observado também as menores concentrações de sedimentos em suspensão (FIGURA 44c). Nesses eventos, com geração de escoamento superficial composto apenas de escoamento duniano e mobilização de sedimentos do canal, observa-se comportamento semelhante ao presente na bacia do Saci.

Nos eventos com área de contribuição entre 1250 e 3150 m², foi observada histerese em laço anti-horário mesmo na ausência de contribuição de escoamento gerado nas estradas (FIGURA 43). Nessas condições, o pico de concentração de sedimentos acontecendo após o pico de vazão pode ser explicado pelo rompimento da camada de sedimentos de maior diâmetro (*armor layer*) que resulta da seleção granulométrica do material de fundo ou ainda por rompimento de barreiras formadas por detritos vegetais acumulados no canal (WILLIAMS, 1989). Assim, o pico de concentração de sedimento é atrasado por ser necessário que o aumento da vazão provoque a disponibilização e o transporte dos sedimentos.

Na bacia V5, mesmo para eventos em que o transporte de sedimentos se dá pela mobilização de sedimentos depositados anteriormente nos canais de drenagem, é observada

relação entre vazão e concentração de sedimentos diferente da observada na bacia Saci para a mesma faixa de vazões. Como pode ser observado na FIGURA 44d a tendência de aumento de concentração de sedimentos em função da vazão, para as vazões acima de 2 L s^{-1} , tem crescimento mais acentuado na bacia V5. Essa diferença evidencia a importância, na bacia V5, da maior quantidade de sedimentos disponíveis nos canais de drenagem pelo acúmulo nos locais de conexão das estradas. Nesse sentido, a conectividade dentro da rede de drenagem, com sedimentos provenientes das estradas, ocorre mesmo em eventos em que não há conexão das estradas pelo escoamento superficial. Na bacia do rio Saci, o incremento de concentração de sedimentos em função do aumento da vazão é muito inferior ao observado no exutório da bacia V5. Isso ocorre porque para a bacia do rio Saci não há conectividade hidrossedimentológica de áreas que não estão dentro da zona ripária. Dessa forma tem-se como resultado menor quantidade de escoamento superficial e menor aporte de sedimentos.

FIGURA 45 – TRANSPORTE E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS CONDICIONADOS PELA CONECTIVIDADE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL



FONTE: O autor (2017)

A relação entre as áreas de geração de escoamento e sedimentos ativos na área de estudo são apresentadas na FIGURA 45. A zona saturada foi dividida em três classes distintas observando as áreas de contribuição (FIGURA 43). A zona saturada próxima às nascentes (ZR 1) não é conectada por escoamento superficial em todos os eventos. A ZR 2 foi definida pela área de contribuição médias para os eventos em que não ocorre geração de escoamento nas nascentes. Essa área é a responsável pela geração de escoamento e mobilização de sedimentos quando ZR 1 não está conectada. Na porção ZR+ES ocorre processos de geração de escoamento superficial diurno além da contribuição da área das estradas. Nessa porção da bacia, ocorre a contribuição de sedimentos das estradas e mesmo quando não estão conectadas o transporte de sedimentos é influenciado pelo material de fundo proveniente das estradas.

Entre as estradas e a rede de drenagem, a conectividade é limitada pela capacidade de infiltração da porção da vertente que os separam. Nessa área, pode ocorrer, portanto, a deposição dos sedimentos, causada pela redução do escoamento convertido em infiltração, ou o transporte, quando o volume de escoamento superar a infiltração. As estradas não conectadas, por ter sua extensão perpendicular ao caminho do escoamento, tem como característica a deposição de sedimentos na própria extensão da estrada e nos locais de saída de escoamento para a vertente.

4.2.2. Simulação hidrossedimentológica com o modelo LISEM

A aplicação do modelo foi realizada para simular a geração de escoamento e produção de sedimentos do evento 24 (TABELA 12 e TABELA 17). Esse evento foi selecionado por possuir a maior área de contribuição de escoamento entre os eventos observados e ter disponibilidade de dados de concentração de sedimentos que permitisse a avaliação da qualidade da simulação nas estações Saci e V5. A área de contribuição de escoamento e a relação de histerese, observados no evento 24, são características de eventos em que, dentro da área da bacia V5, ocorre a contribuição de escoamento e sedimentos provenientes da zona saturada próxima ao canal e de estradas, enquanto, na bacia Saci a área de contribuição é limitada à zona saturada. Além da resposta hidrossedimentológica no exutório das bacias foi observada, durante o processo de calibração, a distribuição espacial dos processos simulados. Assim, foi verificado se a conectividade hidrossedimentológica definida nas análises dos eventos é reproduzida pelo modelo a partir das informações espaciais da área de estudo que definem as características estruturais da conectividade.

Foram realizadas simulações, utilizando primeiramente os valores iniciais dos parâmetros (TABELA 6 e TABELA 7) seguido da calibração manual dos valores dos parâmetros com o objetivo de reproduzir as séries observadas e a distribuição espacial dos processos. Para manter a distribuição espacial dos processos, a calibração foi iniciada definindo uma área saturada, de acordo com a área definida na análise dos eventos, com tamanho de 3150 m² (Figura 32). A umidade inicial para o restante da bacia foi calibrada com valor de 90% da porosidade.

Na calibração do escoamento para a bacia Saci foi necessário ajustar os valores dos parâmetros de rugosidade. Para a rugosidade superficial (*RR*) foi adotado valor de 2 mm para área de reflorestamento e 3 mm para a área de vegetação nativa. O coeficiente de rugosidade de Manning (*n*), foi calibrado em 0,32 s m^{-1/3} para as áreas com vegetação, e 1,6 s m^{-1/3} para o canal. O aumento no valor desse parâmetro foi necessário para a calibração do pico de escoamento.

Na calibração do escoamento para a bacia V5 foi necessário realizar a calibrar dos parâmetros referentes aos caminhos percorridos pelo escoamento entre as estruturas de drenagem das estradas, seguindo pelas encostas até sua conexão com o canal de drenagem. Isso foi necessário para permitir a correta transferência do escoamento. Em observações de campo foi constatado que esses caminhos apresentam feições lineares, que denotam a frequente ocorrência de escoamento, não possuindo as mesmas características de resistência ao escoamento observado no restante das vertentes. Dessa forma, foram atribuídos para essas áreas os mesmos valores dos parâmetros *n*, *RR* e *Ks* utilizados nas estradas.

Para calibrar o escoamento na bacia V5 foi realizada ainda a calibração de parâmetros que influenciam na resposta hidrológica da porção incremental desta bacia, sem alterar parâmetros já calibrados para a área da bacia Saci. Para as estradas foi adotado o valor de 0,09 s m^{-1/3} para o *n* de Manning, 0,05 mm para *RR*, e 0,01 mm h⁻¹ para *Ks*. Nos caminhos de conexão do escoamento foi mantido o valor de *Ks* inicial. Foi necessário ainda ajustar o coeficiente de rugosidade dos canais (*n*) para 0,15 s m^{-1/3}. Essa modificação foi aplicada apenas na extensão dos canais a jusante das estações V3 e Saci.

Baartman et al. (2012) verificaram que o aumento nos valores do coeficiente de Manning do canal de drenagem na calibração do modelo LISEM pode ser necessário devido a obstáculos que causam barramento do escoamento e redução considerável na velocidade em canais pequenos. Em relação às encostas a necessidade de se aumentar os valores do coeficiente

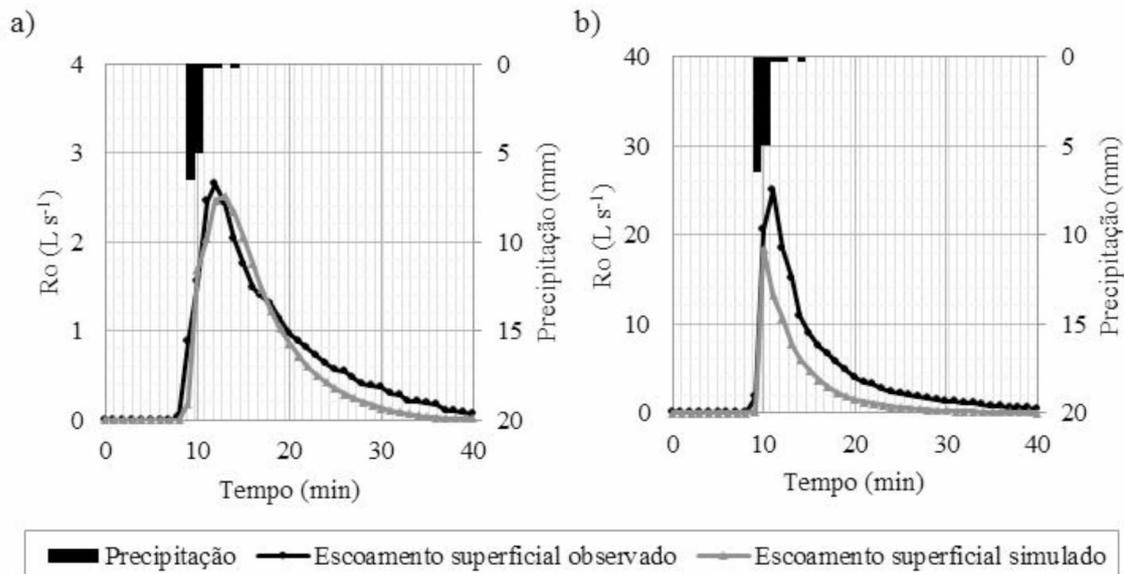
de rugosidade de Manning (n) pode estar relacionada a alta resolução do modelo digital do terreno que causam o aumento da declividade média. Hessel (2005) verificou, em simulações com o modelo LISEM, a tendência de aumento da vazão e redução do tempo de pico com o aumento da resolução espacial das informações topográficas.

TABELA 18 - RESUMO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE ESCOAMENTO POR BACIA

Bacia	Pico de escoamento ($L s^{-1}$)		Volume de escoamento (m^3)		COE
	Observado	Simulado	Observado	Simulado	
Saci	2,64	2,51	16,57	14,37	0,92
V5	25,01	18,41	96,12	49,10	0,71

FONTE: O autor (2017)

FIGURA 46 – ESCOAMENTO SUPERFICIAL OBSERVADO E SIMULADO



FONTE: O autor (2017)

LEGENDA: a) Resultados para a bacia Saci. b) Resultados para a bacia V5

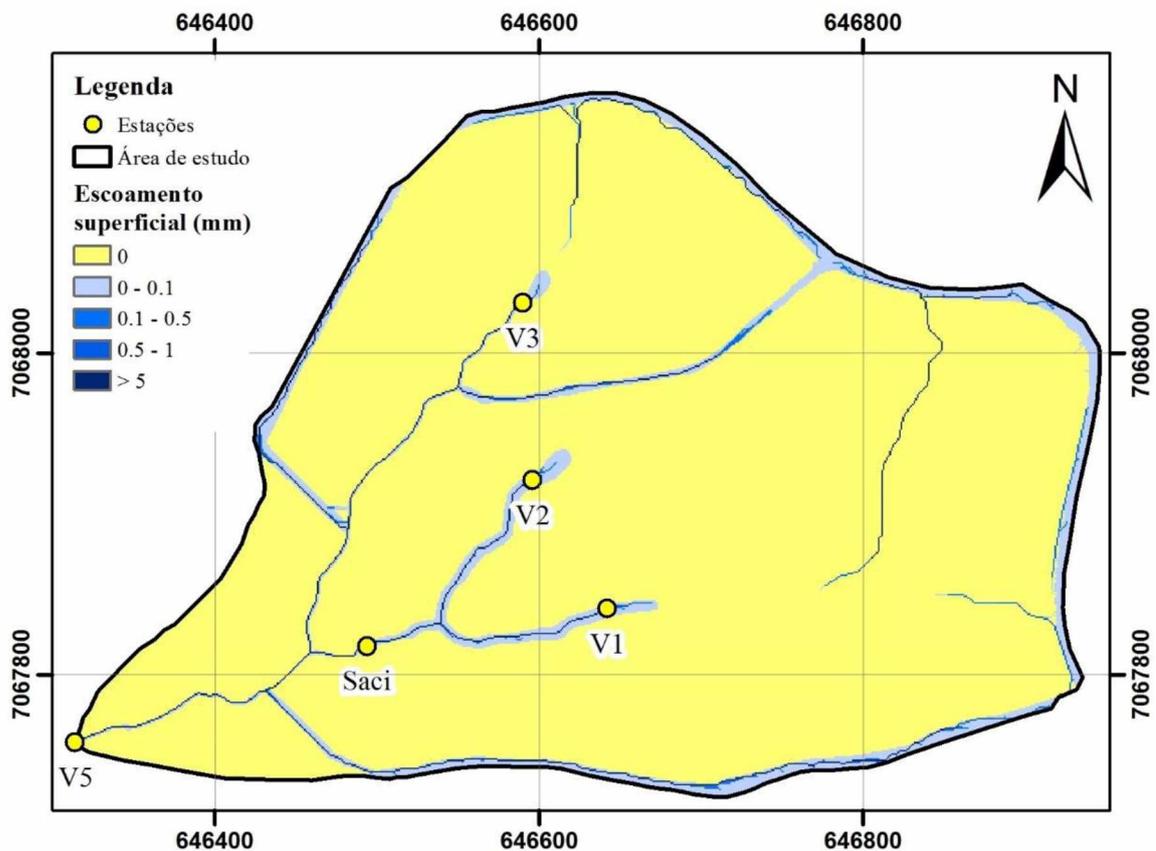
Os resultados da simulação do escoamento são apresentados na TABELA 18. Para a bacia Saci o escoamento foi bem representado pelo modelo, apresentando coeficiente de eficiência de 0,92. Além disso, apresentou boa representação do comportamento do hidrograma ao longo do evento (FIGURA 46a).

Os valores simulados para o escoamento superficial da bacia V5 apresentaram coeficiente de eficiência igual a 0,71, podendo então considerar a calibração satisfatória. O

volume de escoamento foi subestimado, para a bacias V5, em 51 % (TABELA 18). Não foi possível ajustar o hidrograma simulado para que o tempo de pico de escoamento fosse o mesmo que o observado, sem que houvesse maior redução do volume de escoamento simulado.

A distribuição espacial do escoamento superficial (FIGURA 47), foi simulada de forma consistente com a distribuição esperada, sendo as áreas de contribuição de escoamento superficial concentradas no entorno dos canais de drenagem e nas estradas. O escoamento gerado nas estradas foi corretamente direcionado para os locais de transferência de escoamento para as encostas, de acordo com o observado em campo.

FIGURA 47 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL SIMULADO



FONTE: O autor (2017)

Dentro da área da bacia Saci o escoamento simulado foi totalmente produzido na zona saturada, não havendo contribuição de escoamento de áreas a montante, mesmo havendo a geração de escoamento nas estradas presentes nessa bacia. O escoamento produzido nas estradas foi direcionado para as vertentes apenas em dois pontos, de acordo com as estruturas

de drenagem presentes na área. A partir desses pontos, o escoamento simulado teve alcance limitado, não atingindo os canais de drenagem e, portanto, ocorre a desconectividade hidrológica entre estradas e canais de drenagem.

Para a área da bacia V5 foi observada na simulação a conexão do escoamento proveniente das três porções que drenam em direção das zonas com conexão frequente e da zona saturada no entorno dos canais de drenagem (FIGURA 45). O escoamento gerado nas estradas localizadas na porção norte e leste da área de estudo, que drenam em direção a nascentes V1 e V3, apresentaram na simulação conectividade com as encostas com a plantio de *Pinus*, mas o escoamento não atinge as nascentes havendo perda por infiltração. Sendo assim, as estradas não apresentam conectividade hidrológica com as nascentes e não compõe, portanto, área de contribuição efetiva. As porções de estradas que tem escoamento direcionado para os canais de drenagem a jusante das estações V3 e Saci, por outro lado, contribuem com escoamento e têm influência na resposta hidrológica observada na estação V5.

Para as duas bacias a produção total de sedimentos simulada no evento apresentou valores próximos aos observados (TABELA 19), havendo diferença de 14 %, na bacia Saci, e 12 % na bacia V5. Durante a calibração as modificações nos valores dos parâmetros de coesão (*Coh*) e estabilidade de agregados (*As*) não apresentaram melhorias significativas nas simulações da produção de sedimentos e foram adotados na simulação os valores iniciais desses parâmetros (TABELA 6).

TABELA 19 - RESUMO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR BACIA

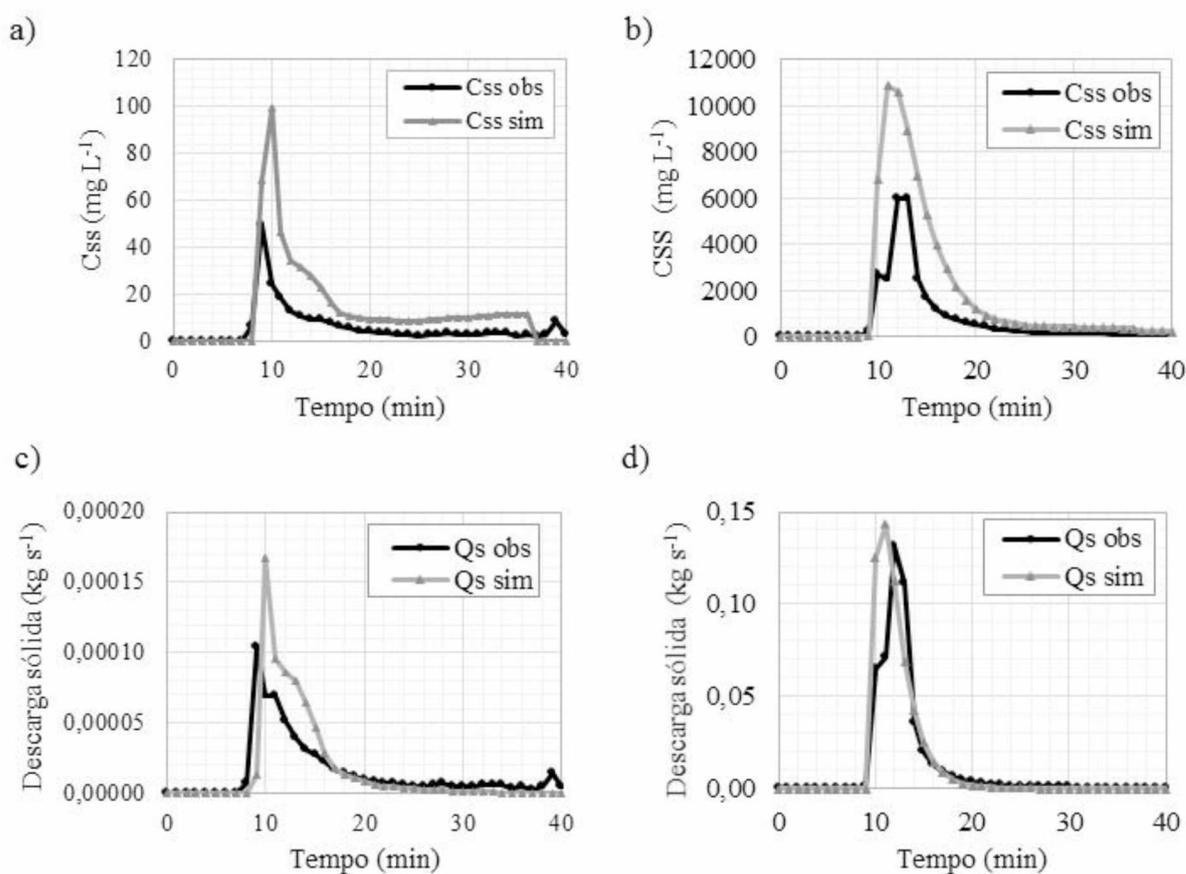
Bacia	Css max (mg L ⁻¹)		Sed. Total (kg)		COE
	Observado	Simulado	Observado	Simulado	
Saci	49,25	99,37	0,35	0,40	-0,25
V5	6017	10895	296	333	0,68

FONTE: O autor (2017)

Na bacia Saci, tanto a concentração de sedimentos em suspensão como da descarga de sólida foram superestimadas (FIGURA 48a e 48c). Além de apresentar valores superiores aos observados ocorreu na simulação a representação do pico de concentração de sedimentos depois do registrado pelo monitoramento. Mesmo assim o pico de concentração de sedimentos simulado antecede o pico de vazão estando de acordo com os dados observados. Essa diferença

tem como consequência um ajuste não satisfatório com coeficiente de eficiência de -0,25, mesmo com produção de sedimentos total do evento simulado apresentando valor próximo ao observado. Para a bacia V5, a concentração de sedimentos e a descarga sólida simuladas apresentaram comportamento próximo ao dos dados observados ao longo dos eventos (FIGURA 48b e 48d), resultando em um coeficiente de eficiência de 0,68.

FIGURA 48 - TRANSPORTE DE SEDIMENTOS OBSERVADO E SIMULADO

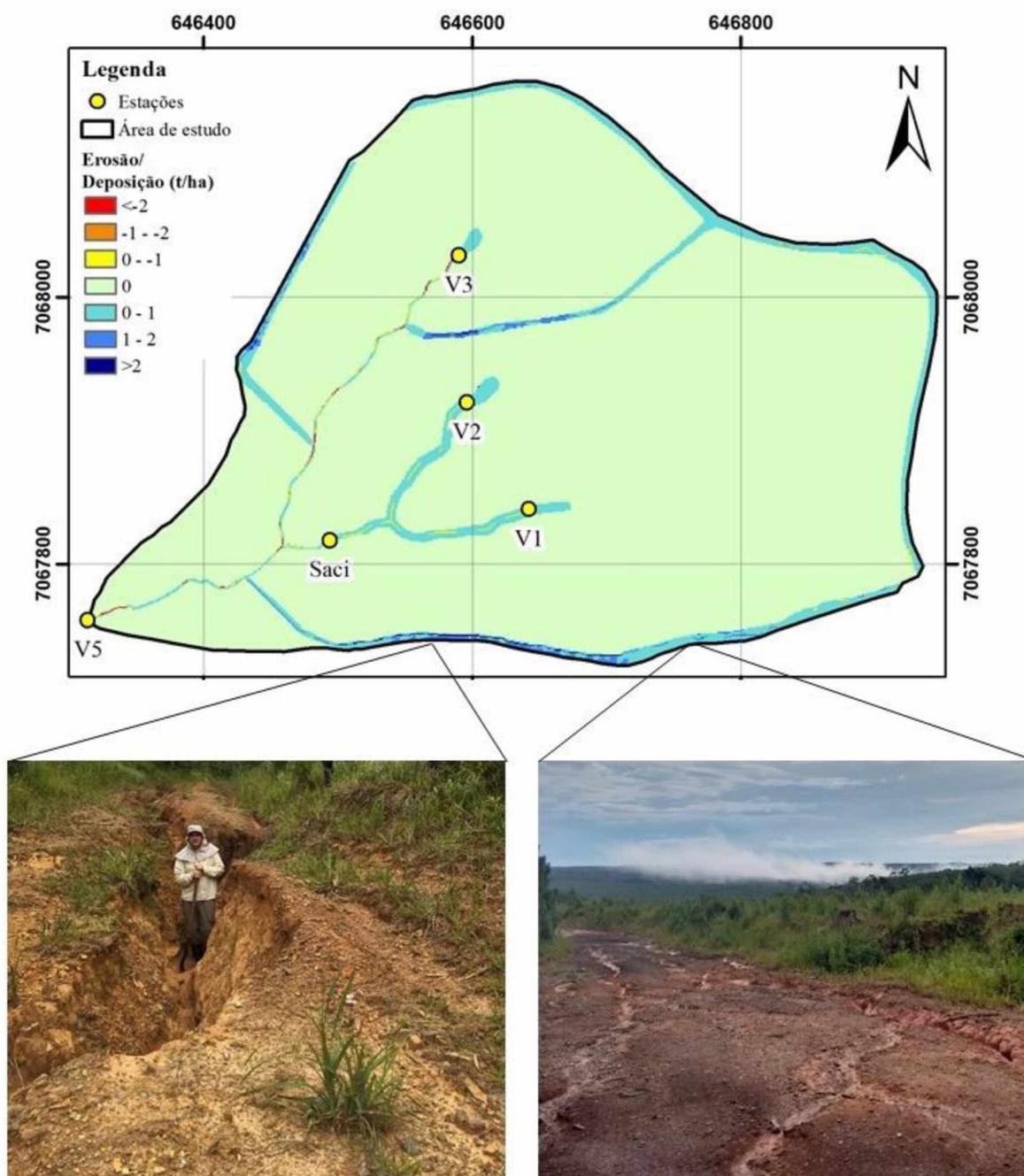


FONTE: O autor (2017)

LEGENDA: a) Concentração de sedimentos em suspensão na bacia Saci. b) Concentração de sedimentos em suspensão na bacia V5. c) Descarga sólida da bacia Saci. d) Descarga sólida da bacia V5.

Ao observar a distribuição espacial da simulação de erosão e deposição de sedimentos, percebe-se que, como consequência da geração de escoamento em proporções específicas da bacia, os processos hidrossedimentológicos, se desenvolvem de forma concentrada em porções da área de estudo onde ocorre acúmulo de escoamento (FIGURA 49).

FIGURA 49 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL EROSIÃO E DEPOSIÇÃO SIMULADAS



FONTE: O autor (2017)

Na simulação, os locais com maior ocorrência de erosão foram identificados nas estradas, com maior intensidade na metade de jusante onde se concentra o escoamento produzido nas estradas. Essa distribuição ao longo da estrada é consistente com o observado na área (FIGURA 49), sendo a ravina resultante do efeito erosivo do escoamento frente ao aumento do comprimento da encosta (HUDSON, 1971). Nas áreas em que o escoamento não se conecta

aos canais de drenagem ocorreu a deposição dos sedimentos na superfície da estrada não havendo entrada de sedimentos nas encostas. A maior parte da área de estudo, com cobertura da vegetação nativa e plantio de *Pinus*, apresenta balanço entre erosão e deposição igual a zero, ou seja, não há processos erosivos ativos ou a massa de solo erodido não é transportada para fora da área atingida pela erosão ocorrendo deposição de todo o sedimento. Nessas áreas não há escoamento para que ocorra erosão pelo efeito do escoamento e no caso da ocorrência de erosão por efeito do salpicamento (*splash*), causada pela chuva não interceptada pela vegetação, não ocorre o transporte do material erodido.

Os sedimentos resultantes da erosão nas estradas são transportados em grandes quantidades até os canais de drenagem o que resulta na deposição em porções do canal de menor declividade localizadas entre as estações V3 e V5 (FIGURA 49). Nessas áreas ocorre o acúmulo de material de fundo, que na análise da conectividade durante os eventos é responsável pelo suprimento de sedimentos em eventos em que não ocorre a conectividade hidrossedimentológica das estradas.

O monitoramento e as análises realizadas permitiram configurar a distribuição espacial dos processos no ambiente de modelagem de forma que o modelo reproduziu adequadamente a dinâmica espacial do escoamento e transporte de sedimentos observada nos eventos. Com essa abordagem foi possível, após calibrar a resposta do escoamento e transporte de sedimentos no exutório das áreas monitoradas, simular corretamente as áreas de ocorrência intensa de processos erosivos nas estradas, deposição no canal de drenagem, bem como, a conectividade entre essas áreas. Isso reforça a necessidade de incorporar informações espaciais nos modelos que permitam definir a espacialização dos processos (TAKKEN et al., 2005; SANTOS, 2009; HÖLZEL; DIEKKRÜGER, 2012).

Destaca-se que para a correta simulação da geração de escoamento e sedimentos no entorno dos canais de drenagem foi necessária a incorporação de uma área saturada. Essa área, identificada por meio da análise dos eventos foi representada no modelo com tamanho fixo ao longo do evento. Esse artifício se fez necessário por não haver no modelo a simulação da expansão e contração de áreas saturadas. O escoamento por saturação ou escoamento duniano, que predomina nas áreas no entorno dos canais da área de estudo, é aquele produzido pela precipitação sobre a área saturada e pela elevação do nível freático que aflora e escoam pela superfície (HORNBERGER et al., 1998). No entanto, no modelo LISEM o escoamento superficial é estimado assumindo a ocorrência de escoamento hortoniano, utilizando a equação de Green-Ampt, sendo assim, não considera o processo de ascensão do nível freático. Portanto,

na simulação realizada o escoamento superficial dessas áreas é calculado considerando apenas o processo de precipitação sobre a área saturada.

A verificação espacial da simulação, possibilitada pelo uso dos modelos espacialmente distribuídos, é necessária para que não se obtenha como resultado uma série simulada no exutório da bacia resultante de uma configuração espacial dos processos incompatível com a realidade (TAKKEN et al., 2009). Isso se torna mais importante ao observar a complexidade que envolve a conectividade do escoamento e transporte de sedimentos, na qual são observadas áreas ativas de determinado processo que não contribuem diretamente para a resposta na saída da bacia, enquanto outras áreas se conectam parcialmente, condicionadas por sua localização e intensidade dos processos.

5. CONCLUSÕES

As análises da concentração de carbono orgânico e agrupamento de amostras de solos e sedimentos a partir dos resultados da análise química elementar permitiram estabelecer um padrão espacial de conectividade para o período analisado. Na área de drenagem da estação Saci ocorre contribuição de sedimentos de áreas próximas aos canais de drenagem, com limitada conectividade das vertentes fora da zona ripária, e com desconectividade das estradas não pavimentadas. Na estação V5 foi identificada forte influência de sedimentos provenientes da superfície e ravinas das estradas não pavimentadas que explicam a ocorrência da produção de sedimentos 278 vezes maior que o observado na estação Saci. Nesse sentido observa-se que a presença de um uso da terra com alto potencial de geração de escoamento e sedimentos na área de drenagem, como as estradas não pavimentadas, não resulta necessariamente em influência direta na resposta hidrossedimentológica observada no exutório da bacia hidrográfica.

Na análise dos 26 eventos de precipitação foi observado, nas bacias V1, V2, V3 e Saci, que para todos os eventos o escoamento superficial foi gerado nas áreas saturadas próximas aos canais de drenagem. A produção de sedimentos observada na estação Saci, com produção total de sedimentos dos eventos variando entre 0,06 e 1,9 kg, foi caracterizada por histerese em laço horário indicando a proveniência de sedimentos de área próxima ao canal de drenagem sendo compatível com a área de geração de escoamento. Dessa forma, destaca-se que não houve conectividade do escoamento e sedimentos gerados nas estradas que drenam para as encostas das bacias V1 e V3.

Na estação V5 foi observada variação nas fontes de contribuição de escoamento e de sedimentos entre os eventos, que apresentaram produção total de sedimentos variando entre 0,8 kg e 528 kg. Em 15 eventos ocorreu a conectividade de escoamento superficial das estradas com a porção do canal de drenagem a jusante das estações V3 e Saci. Nos eventos em que houve conexão de escoamento e sedimentos das estradas os eventos apresentaram histerese em sentido anti-horário (AH) ou não apresentaram histerese (L). Nesses eventos foram observadas as maiores vazões e concentrações de sedimentos em suspensão que resultaram em produções totais de sedimentos variando entre 66 e 528 kg. Os eventos com histerese em sentido horário (H) foram os de menor geração de escoamento, inferior a 7 m³, e de produção total de sedimentos, inferiores a 3 kg, sendo observados apenas quando o escoamento é gerado em porções menores da área saturada, não havendo escoamento superficial nas nascentes. Em cinco

eventos, em que não houve a conexão de escoamento gerado nas estradas foi observada histerese com laço anti-horário, que foram associados ao rompimento da camada de sedimentos de maior diâmetro (*armour layer*) que resulta da seleção granulométrica do material de fundo ou ainda por rompimento de barreiras formadas por detritos vegetais.

Para a bacia V5 a conexão das estradas não ocorre em todos os eventos, no entanto a quantidade de sedimentos transportada e os laços de histerese observados, mostram que o material proveniente das estradas e depositado nos canais é transportado durante eventos em que não há conexão das estradas. Dessa forma, conclui-se que a presença de fontes com grande produção de sedimentos, influencia a dinâmica do transporte de sedimentos, mesmo em eventos em que não ocorre a conexão dessas fontes com os canais de drenagem.

A aplicação do modelo LISEM, com a abordagem de calibração e a avaliação espacial dos processos, permitiu obter resultados coerentes com a resposta hidrossedimentológica das bacias monitoradas e a distribuição espacial dos processos de erosão e deposição de sedimentos, validando assim a conectividade definida na análise dos eventos.

6. RECOMENDAÇÕES

As altas concentrações observadas na estação V5 foram uma limitação para o monitoramento por meio de sensor de turbidez. Nos casos de concentrações acima do limite do sensor, recomenda-se a utilização de amostradores automáticos que possibilitem a coleta de amostras nas fases de ascensão e recessão do hidrograma de cheia, para assim melhor definição das concentrações máximas nos eventos. Além de possibilitar com essas coletas calibração da relação entre turbidez e concentração para as condições de transporte dos eventos.

A complexidade observada na análise de agrupamento utilizando os resultados das análises químicas elementares resultou em dificuldade de definição de agrupamentos precisos por tipo de uso do solo. Parte dessa dificuldade pode estar associada a granulometria das amostras analisadas e dessa forma recomenda-se a realização da análise das características químicas ou físicas para frações mais finas dos sedimentos e solos.

A análise não abrangeu eventos extremos de precipitação. Dessa forma não ocorreu grandes variações nos depósitos de sedimentos nos canais, sendo observada apenas redução em eventos consecutivos na estação Saci. O estudo de períodos com maior amplitude pluviométrica seria desejável para melhor compreensão da conectividade pela variação das condições de acumulação de material de fundo e pela ocorrência de contribuição de outras áreas nas encostas que podem se conectar ao canal, como observado por Santos (2009). Nesse sentido, a utilização de modelos distribuídos de simulação contínua, utilizando séries de dados mais longas, possibilitaria também simular a dinâmica dos depósitos de sedimentos e sua variação condicionada à conectividade hidrossedimentológica de vertentes, estradas e canais de drenagem.

REFERÊNCIAS

- AMBROISE, B. Variable “active” versus “contributing” areas or periods: a necessary distinction. **Hydrological Processes**, v. 18, p. 1149–1155, 2004.
- ASTON, A.R. Rainfall interception by eight small trees: **Journal of Hydrology**. V. 42. p. 383-396. 1979.
- BALDOCK, J. A.; BROOS, K. Soil organic matter. In: **Handbook of Soil Science: Properties and Processes**. Eds HUANG, P. M.; LI, Y; SUMNER. CRC Press, Boca Raton, 2012, p. 1-52
- BAARTMAN, J. E.; JETTEN, V. G.; RITSEMA, C. J.; VENITE, J. Exploring effects of rainfall intensity and duration on soil erosion at the catchment scale using openLISEM: Prado catchment, SE Spain. **Hydrological Processes**, v. 26, n. 7, p. 1034-1049, 2012.
- BARROS, C. A. P.; MINELLA, J. P. G.; DALBIANCO, L.; RAMON, R. Description of hydrological and erosion processes determined by applying the LISEM model in a rural catchment in southern Brazil. **Journal of soils and sediments**, v. 14, n.7, p. 1298-1310, 2014.
- BEGUERÍA, S.; ANGULO-MARTÍNEZ, M.; GASPAR, L.; NAVAS, A. Detachment of soil organic carbon by rainfall splash: Experimental assessment on three agricultural soils of Spain. **Geoderma**, v. 245, p 21-30, 2015.
- BERTOL, I.; SANTOS, J. C. P. Uso do solo e propriedades físico-hídricas no Planalto Catarinense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 30, n.2, p. 263-267, 1995.
- BEVEN, K. Rainfall-runoff modelling: the primer: Wiley, 2001. v. 15p. 360
- BEYER, L.; FRÜND, R.; SCHLEUB, U.; WACHENDORF, C. Colluvisols under cultivation in Schleswig-Holstein. 2. Carbon distribution and soil organic matter composition. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, v. 156, n. 3, p. 213-217, 1993.
- BOGNOLA, I. A. **Unidades de manejo para Pinus taeda L. no planalto norte catarinense, com base em características do meio físico**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Paraná. 2007, 160 p.
- BRACKEN, L. J.; CROKE, J. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. **Hydrological Processes**, v. 1763, p. 1749-1763, 2007.
- CAMMERAAT, L. H. A review of two strongly contrasting geomorphological systems within the context of scale. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 27, n. 11 2002, 1201-1222.
- COLLINS, A. L.; WALLING, D. E. Documenting catchment suspended sediment sources: problems, approaches and prospects. **Progress in Physical Geography**, v. 28, n. 2, p. 159–196, 2004.
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 1994.

CORRÊA, C. M. C.; DEDECEK, R. A.; ROLOFF, G. Sedimentos provenientes de estradas de uso florestal em condição de relevo ondulado a fortemente ondulado. **Floresta**, v.40, no. 1, p. 221-234, 2010.

CLIFFORD, N. J.; RICHARDS, K. S.; BROWN, R. A.; LANE, S. N. Laboratory and field assessment of an infrared turbidity probe and its response to particle size and variation in suspended sediment concentration. **Hydrological Sciences Journal**, v. 40, n. 6, p. 771-791, 1995.

CROKE, J.; MOCKLER, S.; FOGARTY, PETER; TAKKEN, I. Sediment concentration changes in runoff pathways from a forest road network and the resultant spatial pattern of catchment connectivity. **Geomorphology**, v. 68, n. 3-4, p. 257-268, 2005.

DALAGNOL, E.F.N. **Subsídios para o zoneamento da APA do Rio dos Bugres, Rio Negrinho – SC, com vistas ao aproveitamento de água para abastecimento público**. Florianópolis, 2001. 166f. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina.

BOER, D.H.; CAMPBELL, I.A. Spatial scale dependence of sediment dynamics in a semi-arid badland drainage basin. **Catena**, v.16, p. 277-290, 1989.

DEHOTIN, J.; BREIL, P.; BRAUD, I.; LAVENNE, A.; LAGOUY, M.; SARRAZIN, B. Detecting surface runoff location in a small catchment using distributed and simple observation method. **Journal of Hydrology**, v. 525, p. 113-129, 2015.

DE ROO, A. P. J.; WESSELING, C. G.; JETTEN, V. G. LISEM: a physically-based hydrological and soil erosion model incorporated in a GIS. **IAHS Publication**, n. 235, p. 395-403, 1996.

DE ROO, A. P. J.; V. G. JETTEN. Calibrating and validating the LISEM model for two data sets from the Netherlands and South Africa. **Catena** 37, no. 3, p. 477-493, 1999.

DEHOTIN, J.; BREIL, P.; BRAUD, I.; LAVENNE, A.; LAGOUY, M.; SARRAZIN, B. Detecting surface runoff location in a small catchment using distributed and simple observation method. **Journal of Hydrology**, v. 525, p. 113-129, 2015.

DICK, D. P.; MARTINAZZO, R. Matéria orgânica em ambientes terrestres e aquáticos: compartimentos, composição e reações. In: POLETO, C.; MERTEN, G. H (Orgs). *Qualidade dos Sedimentos*. Porto Alegre: ABRH, 2006. p. 141-179.

DICK, D. P.; NOVOTNY, E. H.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Química da matéria orgânica do solo. In: **Química e Mineralogia do Solo - Parte II Aplicações**. Eds. MELO, V. F.; ALLEONI, R. F., SBSC, Viçosa, 2009, p. 1-67.

DICKINSON, W.T.; WHITELEY, H. Watershed areas contributing to runoff. **IAHS Publication**, 96, 1970. p.12-26.

DUNNE, T.; BLACK, R. D. (1970) Partial area contributions to storm runoff in a small New England Watershed. **Water Resources Research**, v. 6, n. 5, p. 1296-1311, 1970.

EDER, A.; STRAUSS, P.; KRUEGER, T.; QUINTON, J. N. Comparative calculation of suspended sediment loads with respect to hysteresis effects (in the Petzenkirchen catchment, Austria). **Journal of Hydrology**, v. 389, n. 1-2, p. 168-176, 2010.

EPAGRI/CIRAM. **Zoneamento agroecológico e socioeconômico**. 2006. Disponível em: <http://www.ciram.com.br/ciram_arquivos/arquivos/portal/agricultura/zoneAgroecologico/ZonaAgroeco.pdf> Acesso em: 25 de julho de 2012.

EVANS, M.G.; WARBURTON, J.; YANG, J. Eroding blanket peat catchments: global and local implications of upland organic sediment budgets. **Geomorphology**, v.79, p. 45–57, 2006.

FRYIRS, K. A.; BRIERLEY, G. J.; PRESTON, N. J.; KASAI, M. Buffers, barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades. **Catena**, v. 70, n. 1, p. 49–67, 2007.

FRYIRS, K. (Dis)Connectivity in catchment sediment cascades: A fresh look at the sediment delivery problem. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, n. 1, p. 30–46, 2013.

GELLIS, A. C. Factors influencing storm-generated suspended-sediment concentrations and loads in four basins of contrasting land use, humid-tropical Puerto Rico. **Catena**, v. 104, p. 39–57, 2013.

GIGLIO, J. N. **Interceptação da chuva em pequena bacia experimental coberta por floresta ombrófila mista**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013, 194 p.

GOMES, N. M.; de MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; BESKOW, S. Aplicabilidade do LISEM (Limburg Soil Erosion) para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica tropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.6, p.2483-2492, 2008.

GOMI, T.; SIDLE, R. C.; RICHARDSON, J. S. Understanding processes and downstream linkages of headwater systems. **BioScience**, v. 52, p. 905–916, 2002.

GOVERS, G. Empirical relationships on the transporting capacity of overland flow: **IAHS Publication** 189, p. 45-63, 1990.

GRANDO, A.; MACIEL, C. B.; KOBAYAMA, M.; RIBAS JUNIOR, U.; LANGA, R. Avaliação da Perda de Solo na Área de Reflorestamento de *Pinus taeda* com Modelo RUSLE: Estudo de Caso de Rio Negrinho - SC. In: **VIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**, Campo Grande: UFMS, 2008.

GREGORY, K. J.; WALLING, D. E. **Drainage Basin Form and Process**. Edward Arnold: London, 1973.

GRUSZOWSKI, K. E.; FOSTER, I. D. L.; LEES, J. A.; CHARLESWORTH, S. M. Sediment sources and transport pathways in a rural catchment, Herefordshire, UK. **Hydrological Processes**, v. 17, n. 13, p. 2665-2681, 2003.

HAIRSINE, P. B.; CROKE, J. C.; MATHEWS, H.; FOGARTY, P.; MOCKLER, S. P. Modelling plumes of overland flow from logging tracks. **Hydrological Processes**, v. 16, n. 12, p. 2311-2327, 2002.

HESSEL, R.; VAN DEN BOSCH, R.; VIGIAK, O. Evaluation of the LISEM soil erosion model in two catchments in the East African Highlands. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 31, n. 4, p. 469-486, 2006.

- HESSEL, R. Effects of grid cell size and time step length on simulation results of the Limburg soil erosion model (LISEM). **Hydrological processes**, v.19, n. 15, p. 3037-3049, 2005.
- HORNBERGER, G. M.; RAFFENSPERGER, J. P.; WIBERG, P. L.; ESHLEMAN, K. N. **Elements of Physical Hydrology**. J. Hopkins, p. 302, 1998.
- HÖLZEL, H.; DIEKKRÜGER, B. Predicting the impact of linear landscape elements on surface runoff, soil erosion, and sedimentation in the Wahnbach catchment, Germany. **Hydrological Processes**, v. 26, n. 11, p. 1642-1654, 2012
- HOPE, D.; PALMER, S. M.; BILLET, M. F.; DAWSON, J. J. C. Variations in dissolved CO₂ and CH₄ in a first-order stream and catchment: an investigation of soil–stream linkages. **Hydrological Processes**, v. 18, p. 3255–3275, 2004.
- HORN, R.; FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil and Tillage Research**, v. 73, n. 1-2, p. 89-99, 2003.
- HUDSON, N. **Soil Conservation**. Ithaca, New York: Cornell University Press, 1971.
- HUSSON, F.; JOSSE, J.; PAGES, J. **Principal component methods, hierarchical clustering, partitional clustering: why would we need to choose for visualizing data?** Technical Reports – AgroCampus, 2010
- HUNG, M. N. W. B.; SAMPAIO, T. V. M.; SCHULTZ, G. B.; SIEFERT, C. A. C.; LANGE, D. R.; MARANGON, F. H. S.; SANTOS, I. Levantamento com veículo aéreo não tripulado para geração de modelo digital do terreno em bacia experimental com vegetação florestal esparsa. **Revista Ra'e Ga Espaço Geográfico em Análise**. Submetido à publicação.
- HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, v.106, p. 211–232, 1989.
- JACINTHE, P.A.; LAL, R.; OWENSB, L.B.; HOTHEM, D.L. Transport of labile carbon in runoff as affected by land use and rainfall characteristics. **Soil & Tillage Research**, v. 77 p. 111–123, 2004.
- JACINTHE, P.A.; LAL, R.; KIMBLE, J.M. A simulation study of carbon dioxide evolution in runoff from long-term no-till and plowed soils. **Soil & Tillage Research** v. 66, p. 23–33, 2002.
- JAIN, V.; TANDON, S. K. Conceptual assessment of (dis)connectivity and its application to the Ganga River dispersal system. **Geomorphology**, v. 118, n. 3-4, p. 349-358, 2010.
- JANSSON, M. B. Determining sediment source areas in a tropical river basin, Costa Rica. **Catena**, v. 47, p. 63–84, 2002.
- JETTEN, V. **LISEM user manual, version 2.x**. Draft version January 2002. Utrecht, Utrecht Centre for Environmental and Landscape Dynamics, Utrecht University, 2002.
- JOHNSON, M. S.; LEHMANN, J.; SELVA, E. C.; ABDO, M.; RIHA, S.; COUTO, E. G. Organic carbon fluxes within and stream water exports from headwater catchments in the southern Amazon. **Hydrological Processes**, v. 20, n. 12, p. 2599-2614, 2006.

JONES, J A; SWANSON, F J; WEMPLE, B C; SNYDER, K. U. Effects of roads on hydrology, geomorphology, and disturbance patches in stream networks. **Conservation Biology**, v. 14, n. 1, p. 76-85, 2000.

JULIEN, P. Y. **Erosion and Sedimentation**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

KARSSENBERG, D.; SCHMITZ, O.; SALAMON, P.; JONG, K.; BIERKENS, M. F. P. A software framework for construction of process-based stochastic spatio-temporal models and data assimilation, **Environmental Modelling & Software**. v. 5, n.4, p.489-502, 2010.

LAFLEN, J.M.; LANE, L.J.; FOSTER, G.R. WEPP: A new generation of erosion prediction technology. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 46, p. 34–38, 1991.

LAL, R. Soil degradation by erosion. **Land Degradation & Development**, v. 12, n. 6, p. 519-539, 2001.

LANE, P. N. J.; SHERIDAN, G. J. Impact of an unsealed forest road stream crossing: water quality and sediment sources. **Hydrological Processes**, v. 16, n. 13, p. 2599-2612, 2002.

LENZI, M. A.; MARCHI, L. Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy). **Catena**, v. 39, n. 4, p. 267-282, 2000.

LEWIS, J. Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation. **Water Resources Research**, v. 32, n. 7, p. 2299–2310, 1996.

LEXARTZA-ARTZA, I.; WAINWRIGHT, J. Hydrological connectivity: Linking concepts with practical implications. **Catena**, v. 79, n. 2, p. 146-152, 2009.

LIU, G.; XU, M.; RITSEMA, C. A study of soil surface characteristics in a small watershed in the hilly, gullied area on the Chinese Loess Plateau. **Catena**, v. 54, n. 1, p. 31-44, 2003.

LUK, S. Effect of Antecedent Soil Moisture Content on Rainwash Erosion. **Catena** v. 12 p. 129–39, 1977

KAMPHORST, E. C.; JETTEN, V.; GUERIF, J.; PITKANEN, J; IVERSEN, B. V.; DOUGLAS, J. T.; PAZ, A. Predicting Depressional Storage from Soil Surface Roughness. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 1992, p. 1749–1758, 2000.

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

LABORATÓRIO DE ENGENHARIA AMBIENTAL FRANCISCO BORSARI NETTO. **Manual de procedimentos para análises em laboratório**. LABEAM-UFPR, 2015.

LANDERS, M.N.; STURM, T.W. Hysteresis in suspended sediment to turbidity relations due to changing particle size distributions. **Water Resources Research**, 49(9), pp.5487-5500, 2013.

LÊ, S.; JOSSE, J.; HUSSON, F. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 25, p. 1-18, 2008.

LUCE, C. H. Hydrological processes and pathways affected by forest roads: what do we still need to learn? **Hydrological Processes**, v. 16, n. 14, p. 2901-2904, 2002.

MAFRA, Á. L.; GUEDES, S. DE F. F.; FILHO, O. K.; SANTOS, J. C. P.; ALMEIDA J. A.; ROSA, J. D. Carbono orgânico e atributos químicos do solo em áreas florestais. **Revista Arvore**, v. 3, p. 217-224, 2008.

MARANGON, F. H. S.; SANTOS, I. Modelagem hidrológica com o topog_sbm na bacia do rio SACI (SC) considerando a dinâmica espacial e temporal das áreas saturadas. **Revista Geonorte**, v.1, v.6, p.66 – 83, 2012.

MCDONNELL, J. J.; SIVAPALAN, M.; VACHÉ, K.; DUNN, S.; GRANT, G.; HAGGERTY, R.; SELKER, J. Moving beyond heterogeneity and process complexity: A new vision for watershed hydrology. **Water Resources Research**, v. 43, n. 7, 2007.

MCDOWELL, W. H.; ASBURY, C. E. Export of carbon, nitrogen, and major ions from three tropical montane watersheds. **Limnology and Oceanography**, v. 39, n. 1, p. 111-125, 1994.

MERRITT, W. S.; REBECCA, A. L.; JAKEMAN, A. J. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling & Software**, v. 18, n. 8, p. 761-799, 2003.

MEYBECK, M.; MOATAR; F. Daily variability of suspended particulate concentration and yields and their effect on river particulates chemistry. **IAHS Publication**. v. 367, 2014.

MINELLA, J. P G; MARTEN, G. H.; REICHERT, M.; SANTOS, D. R. Identificação e implicações para a conservação do solo das fontes de sedimentos em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1637-1646, 2007.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; MAGNAGO, P. F. Análise Qualitativa E Quantitativa Da Histerese Entre Vazão E Concentração de Sedimentos Durante Eventos Hidrológicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n. 12, p. 1306-13, 2011.

MINELLA, JEAN P G; MERTEN, G. H.; REICHERT, M.; SANTOS, D. R. Identificação e implicações para a conservação do solo das fontes de sedimentos em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1637-1646, 2007.

MINELLA, J. P.; MERTEN, G. H.; REICHERT, J. M.; & CLARKE, R. T. Estimating suspended sediment concentrations from turbidity measurements and the calibration problem. **Hydrological processes**, v. 22 n. 12, p. 1819-1830, 2008.

MOATAR, F.; MEYBECK, M. Compared performances of different algorithms for estimating annual nutrient loads discharged by the eutrophic River Loire. **Hydrological processes**, v. 19.2, 429-444, 2005

MORGAN, R. P. C.; QUINTON, J. N.; SMITH, R. E.; GOVERS, G.; POESEN, J. W. A.; AUERSWALD, K.; CHISCI, G.; TORRI, D.; STYCZEN, M. E. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and catchments. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 23, n. July 2016, p. 527-544, 1998.

MORGAN, R. P. C. **Soil Erosion and Conservation**. 3. ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2005.

MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE** v.50, p.885-900, 2007.

MUKUNDAN, R.; WALLING, D. E.; GELLIS, A. C.; SLATTERY, M. C.; RADCLIFFE, D. E. Sediment source fingerprinting: transforming from a research tool to a management tool. **Journal of the American Water Resources Association**. v.48, n. 6, p. 1241-1257, 2012

NASH, J.E. & SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models Part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, 10, 282-290, 1970.

ORWIN, J. F.; SMART, C. C. An inexpensive turbidimeter for monitoring suspended sediment. **Geomorphology**, v. 68, n. 1-2, p. 3-15, 2005.

PEI, T., QIN, C. Z., ZHU, A. X., YANG, L., LUO, M., LI, B., & ZHOU, C. Mapping soil organic matter using the topographic wetness index: a comparative study based on different flow-direction algorithms and kriging methods. **Ecological Indicators**, v. 10(3), p. 610-619, 2010.

POLETO, C.; MERTEN, G. H. Rede de monitoramento e coleta de amostras. In: POLETO, C.; MERTEN, G. H (Orgs). **Qualidade dos Sedimentos**. Porto Alegre: ABRH, 2006. p. 1-33.

POLYAKOV, V.O.; LAL, R. Soil erosion and carbon dynamics under simulated rainfall. **Soil Science** v. 169, p. 590-99, 2004

PRINGLE, C. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? **Hydrological Processes**, v. 17, n. 13, p. 2685-2689, set 2003.

R Development Core Team (2011), R: **A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria: the R Foundation for Statistical Computing. ISBN: 3-900051-07-0. Disponível em <http://www.R-project.org/>.

RAUWS, G AND GOVERS, G. Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. **Journal Soil Science**. 39: p. 111-124, 1988.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SONI, B. Agricultural management effects on soil water process Part I: soil water retention and Green-Ampt infiltration parameters. **Transaction on the ASAE**, v. 26, n. 6, p. 1747-1752, 1983.

RHOTON, F. E.; EMMERICH, W. E.; GOODRICH, D. C.; MILLER, S. N.; MCCHESENEY, D. S. Soil geomorphological characteristics of a semiarid watershed: Influence on carbon distribution and transport, **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p.1532-1540, 2006.

RODRIGUES, M. F.; REICHERT, J. M.; MINELLA, J. P. G.; DALBIANCO, L.; LUDWIG, R. L.; RAMON, R., JÚNIOR, N. B. Hydrosedimentology of nested subtropical watersheds with native and eucalyptus forests. **Journal of soils and sediments**, v. 14, n. 7, p. 1311-1324, 2014.

RODRÍGUEZ-BLANCO, M. L.; TABOADA-CASTRO, M. M.; TABOADA-CASTRO, M. T. Factors controlling hydro-sedimentary response during runoff events in a rural catchment in the humid Spanish zone. **Catena**, v. 82, n. 3, p. 206-217, 2010.

RODRÍGUEZ-CABALLERO, E.; CANTÓN, Y.; JETTEN, V. Biological soil crust effects must be included to accurately model infiltration and erosion in drylands: An example from Tabernas Badlands. **Geomorphology**, v. 241, p. 331-342, 2015.

SADEGHI, S. H. R.; MIZUYAMA, T.; MIYATA, S.; GOMI, T.; KASUGI, K.; FUKUSHIMA, T.; MIZUGAKI, S. ONDA, Y. Determinant factors of sediment graphs and rating loops in a reforested watershed. **Journal of Hydrology**, p. 271–282, 2008.

SAMMORI, T.; YUSOP, Z.; KASRAN, B.; NOGUCHI, S.; TANI, M. Suspended solids discharge from a small forested basin in the humid tropics. **Hydrological Processes**, v. 738, n. August 2001, p. 721–738, 2004.

SANTOS, I. **Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica**. Tese (Doutorado em Geografia) Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

SCHULTZ, G. B. **Avaliação do processo de produção de sedimentos em um trecho de estrada não pavimentada**. Dissertação (Mestrado em Geografia) Universidade Federal do Paraná. 2013.

SEEGER, M.; ERREA, M.; BEGUERIA, S.; ARNAEZ, J.; MARTI, C.; GARCIA- RUIZ, J. Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish pyrenees. **Journal of Hydrology**, v.288, p.299-311, 2004.

SHEIKH, V.; VAN LOON, E.; HESSEL, R.; JETTEN, V. Sensitivity of LISEM predicted catchment discharge to initial soil moisture content of soil profile. **Journal of Hydrology**, v. 393, n. 3, p. 174-185, 2010.

SHELLBERG, J. G.; BROOKS, A. P.; ROSE, C. W. Sediment production and yield from an alluvial gully in northern Queensland, Australia. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 1778, n. April, p. 1765–1778, 2013.

SIDLE, R. C.; SASAKI, S.; OTSUKI, M.; NOGUCHI, S.; RAHIM NIK, A. Sediment pathways in a tropical forest: effects of logging roads and skid trails. **Hydrological Processes**, v. 18, n. 4, p. 703-720, 2004.

SIDLE, R. C. Field observations and process understanding in hydrology: essential components in scaling. **Hydrological Processes**, v. 20, n. 6, p. 1439-1445, 2006.

SILBERSTEIN, R. P. Hydrological models are so good, do we still need data? **Environmental Modelling & Software**, v. 21, p. 1340-1352, 2006.

SILVA, I. F., ANDRADE, A. P., CAMPOS FILHO, O. R., OLIVEIRA, F. A. P. Efeito de diferentes coberturas vegetais e de práticas conservacionistas no controle da erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 10, p. 289-292. 1986.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. Nova Iorque: Oxford university press, 2008, 342 p.

SMITH, H. G.; DRAGOVICH, D. Interpreting sediment delivery processes using suspended sediment-discharge hysteresis patterns from nested upland catchments, south-eastern Australia. **Hydrological processes**, v.23, no. 17, p. 2415-2426, 2009.

SMITH, J. C.; GALY, A.; HOVIUS, N.; TYE, A. M.; TUROWSKI, J. M.; SCHLEPPI, P. Runoff-driven export of particulate organic carbon from soil in temperate forested uplands. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 365, p. 198-208, 2013.

SOULSBY, C.; TETZLAFF, D.; RODGERS, P.; DUNN, S. M.; WALDRON, S. Runoff processes, stream water residence times and controlling landscape characteristics in a mesoscale catchment: an initial evaluation. **Journal of Hydrology**, v.325, p. 197–221, 2006.

TAKKEN, I.; BEUSELINCK, L.; NACHTERGAELE, J.; GOVERS, G.; POESEN, J.; DEGRAER, G. Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM). **Catena**, v. 37, p. 431-447, 1999.

TAKKEN, I.; CROKE, J.; LANE, P. A methodology to assess the delivery of road runoff in forestry environments. **Hydrological Processes**, v. 264, n. July 2007, p. 254–264, 2008.

TAKKEN, I.; GOVERS, G.; JETTEN, V.; NACHTERGAELE, J.; STEEGEN, A.; POESEN, J. The influence of both process descriptions and runoff patterns on predictions from a spatially distributed soil erosion model. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 30, p. 213–229, 2005.

THOMAZ, E. L. Processo hidrológico superficial e uso da terra em Guarapuava-PR: mensurações em parcelas pequenas. **Geografia**, Rio Claro, v. 32, p. 89-106, 2007.

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

TUCCI, C. E. M. Escoamento superficial. In: Tucci, C. E. M. (org.). **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 3.ed. Porto Alegre: ABRH/ UFRGS, 2004. p.391-441.

VANONI, V. A. **Sedimentation Engineering**. Manuals & Reports on Engineering Practice, n.54, 1975.

VENTE, J.; POESEN, J.; ARABKHEDRI, M.; VERSTRAETEN, G. The sediment delivery problem revisited. **Progress in Physical Geography**, v. 31, n. 2, p. 155–178, 2007.

VERTESSY, R. A.; ELSENBEER, H. Distributed modeling of storm flow generation in an Amazonian rain forest catchment: Effects of model parameterization. **Water Resources Research**, v. 35, n. 7, p. 2173-2187, 1999.

WAINWRIGHT, J.; TURNBULL, L.; IBRAHIM, T. G.; LEXARTZA-ARTZA, I.; THORNTON, S. F.; BRAZIER, R. E. Linking environmental regimes, space and time: Interpretations of structural and functional connectivity. **Geomorphology**, v. 126, n. 3, p. 387-404, 2011.

WALLING, D. E. The sediment delivery problem. **Journal of Hydrology**, v. 65, p. 209-237, 1983.

WALLING, D. E. The evolution of sediment source fingerprinting investigations in fluvial systems. **Journal of Soils and Sediments**, v. 13 p. 1658–1675, 2013.

WALLING, D. E.; GREGORY, K. J. The measurement of the effect of building construction on drainage basin dynamics. **Journal of Hydrology**. V. 11, p.129-144. 1970.

WALLING, D. E.; GOLOSOV, V.; OLLEY, J. Introduction to the special issue "Tracer Applications in Sediment Research". **Hydrological Processes**, v. 27, n. 6, p. 775–780, 2013.

WALLING, D. E.; WOODWARD, J. C.; NICHOLAS, A. P.; KINGDOM, U. A multi-parameter approach to fingerprinting suspended-sediment. **IAHS Publication** v. 215, p. 329–338, 1993.

WANG, Z.; GOVERS, G.; STEEGEN, A.; CLYMANS, W.; VAN DEN PUTTE, A.; LANGHANS, C.; MERCKX, R.; VAN OOST, K. Catchment-scale carbon redistribution and delivery by water erosion in an intensively cultivated area. **Geomorphology**, v. 124, p. 65–74, 2010.

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

WALLING, E.; WEBB, W. Sediment availability and the prediction of storm-period sediment yields. **IAHS Publication**, n. 137, p. 327–337, 1982.

WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses** – A guide to conservation planning. Washington, USDA, 1978. 58p.

WISCHMEIER, W.H. A rainfall-erosion index for a Universal Soil Loss Equation. **Soil Science Society of America Journal**., 23, p. 246-249, 1959

WOOD, P. A. Control of variation in suspended sediment concentration in the River Rother, West Susses, England. **Sedimentology**, v. 24, p. 437–445, 1977.

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

ZIEGLER, A. D.; GIAMBELLUCA, T. W. Importance of rural roads as source areas for runoff in mountainous areas of northern Thailand. **Journal of Hydrology**, v. 196, n. 1-4, p. 204-229, 1997.