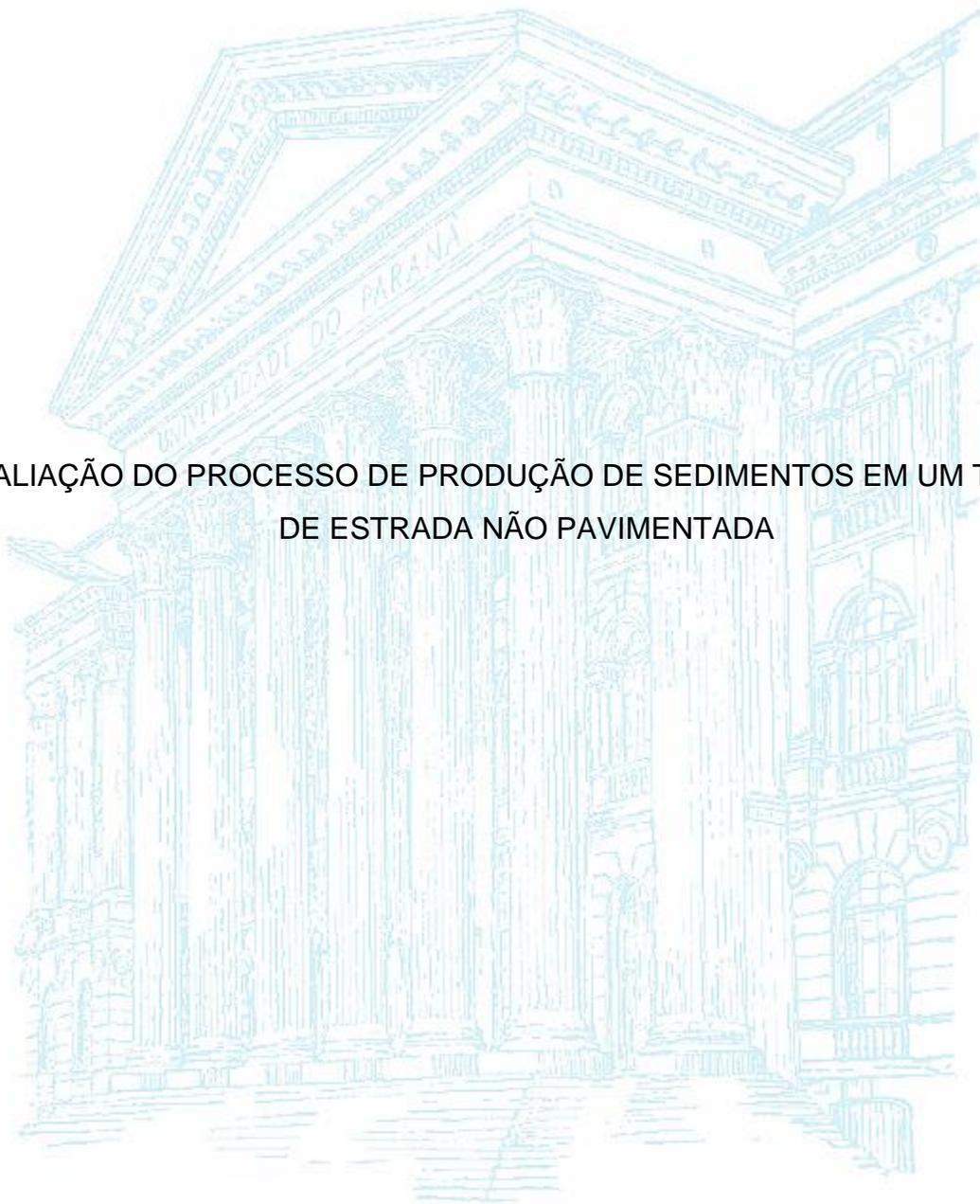


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GILSON BAUER SCHULTZ

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM UM TRECHO
DE ESTRADA NÃO PAVIMENTADA



CURITIBA

2013

GILSON BAUER SCHULTZ

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM UM TRECHO
DE ESTRADA NÃO PAVIMENTADA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientação: Prof. Dr. Irani dos Santos

CURITIBA

2013

S387a

Schultz, Gilson Bauer

Avaliação do processo de produção de sedimentos em um trecho de estrada não pavimentada / Gilson Bauer Schultz. – Curitiba, 2013.
100f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa Interdisciplinar de Pós-graduação em Geografia, 2013.

Orientador: Irani dos Santos .

Bibliografia: p. 93-100.

1. Sedimentos (Geologia). 2. Estradas de terra. 3. Solos - Erosão. I. Universidade Federal do Paraná. II.Santos, Irani dos. III. Título.

CDD: 551.303



MINISTÉRIO DE EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR CIÊNCIAS DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA



PARECER

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Geografia reuniram-se para a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo (a) candidato (a) **GILSON BAUER SCHULTZ** intitulada "AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM UM TRECHO DE ESTRADA NÃO PAVIMENTADA", para obtenção do grau de Mestre em Geografia, do Setor de Ciências da Terra, da Universidade Federal do Paraná Área de Concentração **Espaço, Sociedade e Ambiente**, Linha de Pesquisa **Paisagem e Análise Ambiental**.

Após haver analisado o referido trabalho e argüido o (a) candidato (a), são de parecer pela APROVAÇÃO da Dissertação.

Curitiba, 28 de março de 2013.

Nome e Assinatura da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Irani dos Santos – Orientador

Prof. Dr. Masato Kobiyama (UFSC)

Prof. Dr. Edivaldo Lopes Thomaz (UNICENTRO)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Edison e Ivete, dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Irani dos Santos pelo incentivo, ideias, cobranças e conversas desde os primeiros momentos da iniciação científica até a conclusão desse trabalho.

Agradeço a minha família por apoiar e valorizar o caminho que segui até aqui.

Aos colegas de laboratório Cesar, Daniel, Fernando, Felipe, Rodrigo e Ronald pela ajuda nas exaustivas idas a campo.

À Sérgio Michelotto Braga e Artur Sass Braga pelo auxílio no desenvolvimento de equipamentos de monitoramento.

À Ronald Eugênio Manz por compartilhar as decepções e alegrias do monitoramento.

Aos Colegas Cesar Augusto Crovador Siefert, Fernando Helmuth Syring Marangon e Roberto Fabris Goerl pelas conversas hidrogeomorfológicas.

Ao Professor Jean Paolo Minella pelas valiosas sugestões durante o exame de qualificação.

Aos laboratórios LAMIR e LABSED e seus funcionários pelo apoio durante a realização das análises de solos e sedimentos.

Aos amigos Alexei, Gustavo e Fernando pelas conversas acadêmicas e cotidianas.

Aos secretários da Pós-graduação em Geografia, Luiz Carlos Zen e Adriana Cristina Oliveira.

À empresa Battistella Florestal por disponibilizar a área pra realização deste estudo e pelo apoio nas atividades de campo.

Ao programa REUNI pela concessão de bolsa de estudos.

RESUMO

Poucos trabalhos consideram as estradas não pavimentadas como fator ativo nos processos hidrossedimentológicos. Sendo assim, destaca-se a necessidade do desenvolvimento de pesquisas que abordem os processos de geração de escoamento e sedimentos em estradas não pavimentadas para identificação de características destas superfícies que possibilitem melhor compreensão dos processos e de sua influência em escala de parcela e bacia hidrográfica. O objetivo deste trabalho foi avaliar o processo de produção de sedimentos em um trecho de estrada não pavimentada por meio de monitoramento de longo período e de eventos e aplicação do modelo LISEM. O monitoramento de produção de sedimentos foi realizado para três períodos em seis parcelas, por meio de levantamento topográfico de caixas de contenção e determinação da massa do material depositado. Para o monitoramento de escoamento e produção de sedimentos em eventos foi instalado um equipamento que utiliza cubas basculantes e medição de turbidez em uma parcela. O monitoramento dos períodos mostrou que a erodibilidade das parcelas apresenta relação direta com o tempo entre eventos erosivos. Foram monitorados seis eventos em uma das parcelas. A análise dos eventos mostrou uma tendência de ocorrência do pico de concentração de sedimentos antes do pico de escoamento. Desta forma destacou-se a importância dos sedimentos depositados que são transportados no início dos eventos. As simulações com o modelo LISEM apresentaram uma tendência de subestimar eventos com pequenas produções de sedimentos e o inverso em eventos com maior produção de sedimentos. Foi evidenciado com os resultados das simulações o caráter dinâmico da coesão do solo nas simulações da produção de sedimentos.

Palavra-chave: produção de sedimentos; estradas não pavimentadas; monitoramento; modelo LISEM

ABSTRACT

The researches on hydrosedimentology frequently don't consider the unpaved roads as an active factor of sediment production. Thus, studies concerning the processes of runoff generation and sediment production from unpaved roads are important to identify characteristics of this particular surfaces to increase in the knowledge on the processes and the influence in both plot and watershed scale. The objective of this research was to evaluate the sediment production in an unpaved road segment by monitoring accumulated and event monitoring and posterior modelling using LISEM model. The sediment production monitoring was conducted at three periods in six plots through topographic surveys of the sedimentation basins constructed downstream to each plot. The monitoring of runoff and sediment production during events was performed using a device equipped with tipping buckets and turbidity. The accumulated sediment monitoring showed that the plot's erodibility presents correlation to the time between erosive events. Six events were observed in the monitored plot. In all of these events the sediment concentration peak occurred before the runoff peak. Therefore, the observations emphasized the importance of sediment deposits on the unpaved road surface and the transport of those sediments in the event's beginning. The simulations with LISEM model presented the trend of underestimate in the events with low sediment production and overestimate the events with greater production. Such model results denote the necessity of considering the dynamic characteristic of soil cohesion in sediment production simulations in unpaved roads.

Keywords: sediment production, unpaved roads, monitoring, LISEM model

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes da estrada	19
Figura 2 – Seções transversais de estradas	21
Figura 3 – Posição das estradas nas vertentes.....	22
Figura 4 - Relação entre área de drenagem e taxa de transferencia	25
Figura 5 - Velocidade da água para erosão, transporte e deposição de sedimentos em função do tamanho das partículas	25
Figura 6 - Erosões relacionadas à estrada não pavimentada	29
Figura 7 – Estradas da bacia experimental	37
Figura 8 – Ilustração dos trechos de estrada presentes na área de estudo.....	38
Figura 9 – Componentes da parcela experimental.....	39
Figura 10 – Exemplo de parcela de estrada considerada	39
Figura 11 – Trecho experimental antes e depois da adequação.....	40
Figura 12 – Ensaios de características hídricas da área de estudo.. ..	41
Figura 13 – Medições do volume de caixa de contenção em dois momentos distintos	44
Figura 14 – Composição e vista geral do MAASPE	48
Figura 15 – MAASPE instalado em caixas de contenção	48
Figura 16 – Coeficiente de variação das medições de turbidez	49
Figura 17 – Relação entre turbidímetro de bancada e turbidímetro MAASPE	50
Figura 18 – Curva de calibração do sensor de turbidez MAASPE	50
Figura 19 – Fluxograma de simulação do modelo LISEM.....	51
Figura 20 - Curvas granulométricas de amostras coletadas nos trechos e nas caixas de contenção e limite superior das classes granulométricas de argila, silte e areia..	58
Figura 21 – Variação na massa de sedimentos transportados das parcelas para as caixas de contenção.....	59
Figura 22 – Ensaios de infiltração comparando o ajuste da equação de Horton com a precipitação máxima observada no período de estudo	61
Figura 23 – Comparação entre ajuste dos modelos de Kostiakov e Horton e dados ensaiados.....	62
Figura 24 – Produção de sedimentos acumulada em cada período	65
Figura 25 – Relação entre EI_{30} e Produção de sedimentos	68

Figura 26 – Relação entre produção de sedimentos e o fator LS	69
Figura 27 – Fator k ($t\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$) para cada período.....	69
Figura 28 – Precipitação e eventos erosivos durante o período estudado.....	70
Figura 29 – Relação entre fator K e tempo máximo relativo entre eventos erosivos.	70
Figura 30 – Perfil longitudinal do trecho experimental anterior à adequação	72
Figura 31 - Perfil longitudinal do trecho experimental após a adequação	72
Figura 32 – Escoamento e concentração de sedimentos observados no evento 1...	75
Figura 33 – Escoamento e concentração de sedimentos observados no evento 2...	75
Figura 34 – Escoamento e concentração de sedimentos observados no evento 3...	76
Figura 35 – Escoamento e concentração de sedimentos observados no evento 4...	76
Figura 36 – Escoamento e concentração de sedimentos observados no evento 5...	77
Figura 37 – Escoamento e concentração de sedimentos observados no evento 6...	77
Figura 38 – Relação entre vazão e concentração de sedimentos nos eventos observados.....	78
Figura 39 – Avaliação das simulações	85
Figura 40 – Hidrogramas e sedimentogramas observados e simulados do Evento 1	82
Figura 41 - Hidrogramas e sedimentogramas observados e simulados do Evento 2	82
Figura 42 - Hidrogramas e sedimentogramas observados e simulados do Evento 3	83
Figura 43 - Hidrogramas e sedimentogramas observados e simulados do Evento 4	83
Figura 44 - Hidrogramas e sedimentogramas observados e simulados do Evento 5	84
Figura 45 - Hidrogramas e sedimentogramas observados e simulados do Evento 6	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Importância das estradas na produção de sedimentos	27
Tabela 2 – Modelo utilizados para simulação de erosão em estradas	34
Tabela 3 – Métodos utilizados no monitoramento da produção de sedimentos em estradas	32
Tabela 4 – Resumo das características morfológicas de cada parcela estudada	56
Tabela 5 – Ajuste dos modelos de infiltração	60
Tabela 6 – Classes de condutividade hidráulica saturada	62
Tabela 7 – Densidade e porosidade do solo no leito da estrada e em área externa	64
Tabela 8 – Acumulo de sedimentos e densidade do depósito	64
Tabela 9 – Resumo da precipitação e índice EI_{30} dos períodos considerados	66
Tabela 10 – Parâmetros utilizados e estimativa do efeito da adequação na diminuição da erosão	71
Tabela 11 – Resumos dos eventos monitorados	74
Tabela 12 – Valores iniciais e calibrados dos parâmetros do modelo LISEM	79
Tabela 13 – Valores observados e simulados com o modelo LISEM	80

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
<i>MDS</i>	Armazenamento máximo em depressões	mm
<i>a</i>	Constante na equação de Kostiakov	adimensional
<i>A</i>	Total de sedimentos produzido	t.ha ⁻¹
<i>A_e</i>	Erosão entre-sulcos	t.ano ⁻¹
<i>A_m</i>	Erosão nas margens dos canais fluviais	t.ano ⁻¹
<i>Are</i>	Porcentagem da fração areia	%
<i>Arg</i>	Porcentagem da fração argila	%
<i>A_s</i>	Erosão em sulcos	t.ano ⁻¹
<i>A_{sec}</i>	Área da seção	m ²
<i>As</i>	Estabilidade de agregados	adimensional
<i>A_t</i>	Erosão total	t.ano ⁻¹
<i>C</i>	Fator de uso e manejo do solo	adimensional
<i>COE</i>	Coefficiente de eficiência	adimensional
<i>Coh</i>	Coesão do solo úmido	kPa
<i>C_s</i>	Concentração de sedimentos	kg.m ⁻³
<i>D</i>	Densidade do material	t/m ³
<i>D₅₀</i>	Diâmetro mediano dos sedimentos	µm
<i>Df</i>	Desagregação pelo escoamento	g.s ⁻¹
<i>Dp</i>	Deposição de sedimentos	g.s ⁻¹
<i>Ds</i>	Desagregação por salpicamento	g.s ⁻¹
<i>D_{ss}</i>	Densidade do solo seco	g.cm ⁻³
<i>dx</i>	Largura da célula	m
<i>E</i>	Energia do evento de precipitação	MJ.ha ⁻¹ .mm ⁻¹
<i>e</i>	Transporte de sedimentos	g.s ⁻¹
<i>h_i</i>	Altura da lâmina de água no poço	cm
<i>h_w</i>	Altura da lâmina de água na superfície do solo	mm
<i>i</i>	Taxa de infiltração	mm.h ⁻¹
<i>I</i>	Infiltração acumulada	m
<i>I_p</i>	Intensidade da precipitação	mm.h ⁻¹
<i>I₃₀</i>	Intensidade da precipitação máxima em 30 min	mm.h ⁻¹
<i>i_f</i>	Taxa de infiltração final	mm.h ⁻¹
<i>i_i</i>	Taxa de infiltração inicial	mm.h ⁻¹
<i>k</i>	Constante na equação de Horton	adimensional
<i>K</i>	Fator de erodibilidade do solo	t.ha.h.ha ⁻¹ .MJ ⁻¹ .mm ⁻¹

Ke	Energia cinética	$J.m^{-2}$
K_{fs}	Condutividade hidráulica saturada do poço	$m.dia^{-1}$
L	Distância entre seções transversais	m
LS	Fator topográfico	adimensional
m	Expoente para cálculo do fator LS	adimensional
m_s	Massa do solo seco	g
M_{sed}	Massa de sedimentos depositada entre medições	t
n	Coeficiente de Manning	$m^{-1/3}.s$
P	Fator de práticas conservacionistas	adimensional
P_p	Precipitação	mm
P_{30}	Precipitação máxima acumulada em 30 minutos	mm
Q	Escoamento	$m^3.s^{-1}$
Q_s	Produção de sedimentos	$t.ano^{-1}$
r	Raio do poço	cm
R	Erosividade da chuva	$MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}$
R^2	Coeficiente de determinação	adimensional
R_h	Raio hidráulica	m
RR	Rugosidade da superfície	mm
S	Declividade	m/m
SRD	Taxa de transferência	adimensional
t	Tempo	h
Tc	Capacidade de transporte	$kg.m^{-3}$
V	Velocidade do escoamento	$m.s^{-1}$
V_1	Volume medido no tempo 1	m^3
V_2	Volume medido no tempo 2	m^3
$V_{água}$	Volume de água presente na amostra	cm^3
V_c	Volume do cilindro	cm^3
V_s	Velocidade de queda das partículas	$m.s^{-1}$
V_{sed}	Volume de sedimentos	m^3
w	Largura do escoamento	m
α	Porosidade total	cm^3/cm^3
θ	Declividade	°
λ	Comprimento de rampa	m
Ψ_m	Potencial matricial na frente de molhamento	mm
VIB	Velocidade básica de infiltração	mm/h

SUMÁRIO

1. Introdução	16
2. Objetivos	18
2.1. Objetivo geral	18
2.2. Objetivos específicos.....	18
3. Revisão bibliográfica	19
3.1. Características morfológicas de estradas não pavimentadas.....	19
3.2. Produção de sedimentos em bacias hidrográficas e o impacto das estradas não pavimentadas	23
3.3. Produção de sedimentos em estradas não pavimentadas	26
3.3.1. Erosão em estradas não pavimentadas.....	28
3.3.2. Adequação de estradas não pavimentadas	30
3.4. Monitoramento de processos hidrossedimentológicos em estradas não pavimentadas.....	31
3.5. Modelagem de processos hidrossedimentológicos em estradas não pavimentadas.....	33
4. Material e métodos	36
4.1. Área de estudo	36
4.2. Delimitação de área de estudo	38
4.3. Caracterização físico-hídrica das parcelas.....	40
4.3.1. Granulometria	40
4.3.2. Ensaio de infiltração e condutividade hidráulica saturada.....	41
4.3.3. Densidade do depósito de sedimentos e do solo e porosidade total ..	43
4.4. Produção acumulada de sedimentos	43
4.4.1. Produção acumulada com adequação.....	43
4.4.1. Previsão de produção acumulada de sedimentos.....	45
4.4.2. Avaliação do efeito da adequação do trecho	46
4.5. Produção de sedimentos de estradas em eventos.....	47
4.5.1. Monitoramento de eventos.....	47

4.5.1. Teste do turbidímetro	49
4.5.2. Modelagem da produção de sedimentos de parcelas em eventos	51
4.5.2.1. Dados para a simulação	54
5. Resultados e discussão	56
5.1. Caracterização topográfica das parcelas	56
5.2. Atributos físico-hídricos das parcelas	56
5.2.1. Granulometria	56
5.2.2. Infiltração	59
5.2.3. Densidade e porosidade	63
5.1. Produção de sedimentos em longo período	64
5.2. Definição de parâmetros USLE e suas relações com a produção de sedimentos	65
5.2.1. Efeito da adequação das estadas na produção de sedimentos	71
5.3. Produção de sedimentos em eventos	73
5.4. Simulação do escoamento e produção de sedimentos em eventos com o modelo LISEM.....	79
6. Conclusões	86
7. Recomendações	88
8. Referências.....	89

1. INTRODUÇÃO

Os processos erosivos, bem como o transporte e deposição de sedimentos, são relevantes pelo potencial de impactos ambientais e econômicos. Nas encostas ocorre o processo de erosão da superfície do solo no qual é removida a camada fértil e os sedimentos transportados podem ser depositados soterramento da camada superior do solo (MORGAN, 2005). A entrada dos sedimentos nos canais fluviais causa aumento da turbidez devido ao transporte das partículas em suspensão, influenciando processos biológicos no ambiente aquático (PITLICK e WILCOCK, 2001). Os sedimentos podem também impactar sistemas de abastecimento e geração de energia nos quais causam o assoreamento de reservatórios (CARVALHO, 1994) e dificultam o tratamento da água para abastecimento urbano (KOBAYAMA *et al.* 2011).

Os estudos de produção e transporte de sedimento em bacias hidrográficas, frequentemente consideram como fatores de maior relevância as características físicas da área, como geologia, solos, relevo e cobertura vegetal e as modificações nelas realizadas. No entanto, poucos trabalhos consideram a rede de estradas como agente ativo nos processos hidrossedimentológicos (DUNNE, 1979; JORDÁN-LÓPEZ *et al.*, 2009).

Apesar de sua importância para as relações humanas, a construção de estradas não pavimentadas, pode causar impactos na dinâmica natural da paisagem em que estão inseridas. Os impactos mais notáveis são a modificação morfológica das encostas e a compactação do solo que causam alterações no comportamento hidrológico e acentuam os processos naturais de erosão.

No Brasil, a rede viária possui 1.580.813 km, dos quais 87% não são pavimentadas (DNIT, 2009). A importância destas estradas vem da necessidade de locomoção de pessoas e mercadorias, para os mais variados fins, possibilitando o fluxo de informações e produtos. Em áreas de exploração florestal a densidade de estradas é mais elevada em comparação com outros usos do solo (GOERL *et al.*, 2011). Sendo assim, nestas áreas as estradas são responsáveis por grande proporção da produção de sedimentos.

Destaca-se assim a necessidade do desenvolvimento de pesquisas que abordem os processos de geração de escoamento e sedimentos em estradas não

pavimentadas para identificação de características destas superfícies que possibilitem melhor compreensão de sua influência em escala de parcela e bacia hidrográfica.

Os estudos em estradas têm privilegiado o monitoramento da produção de sedimentos acumulada, limitando as possibilidades de novos desenvolvimentos na compreensão de processos complexos na ocorrência da erosão em estradas. Assim destaca-se a necessidade do desenvolvimento de novas formas de monitoramento priorizando a descrição de eventos. Neste sentido, a utilização de métodos de monitoramento e modelagem dos processos de produção de sedimentos é relevante para a melhor compreensão da influência das estradas não pavimentadas na produção de sedimentos.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o processo de produção de sedimentos em um trecho de estrada não pavimentada utilizando monitoramento e modelagem.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a relação da produção de sedimentos com os parâmetros de erosividade, erodibilidade e fator topográfico da USLE;
- determinar as características físico-hídricas das parcelas;
- avaliar o efeito da adequação da estrada na produção de sedimentos;
- monitorar de forma automatizada o escoamento e a produção de sedimentos durante eventos de precipitação;
- definir parâmetros de produção de sedimento em estradas não pavimentadas;
- simular o escoamento superficial e produção de sedimentos em estradas não pavimentadas utilizando o modelo LISEM.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

Estrada é uma faixa caracterizada por uma superfície que permite o tráfego de veículos (POLITANO *et al.*, 1989). No Brasil, as estradas são as principais vias utilizadas para o transporte de produtos, sobretudo, agropecuários e florestais.

Dentre os componentes das estradas apresentados por Keller e Sherar (2003), os principais estão representados na Figura 1. O leito corresponde à superfície disponível para o tráfego ou superfície de rolamento e é o componente que define a estrada e, portanto está sempre presente.

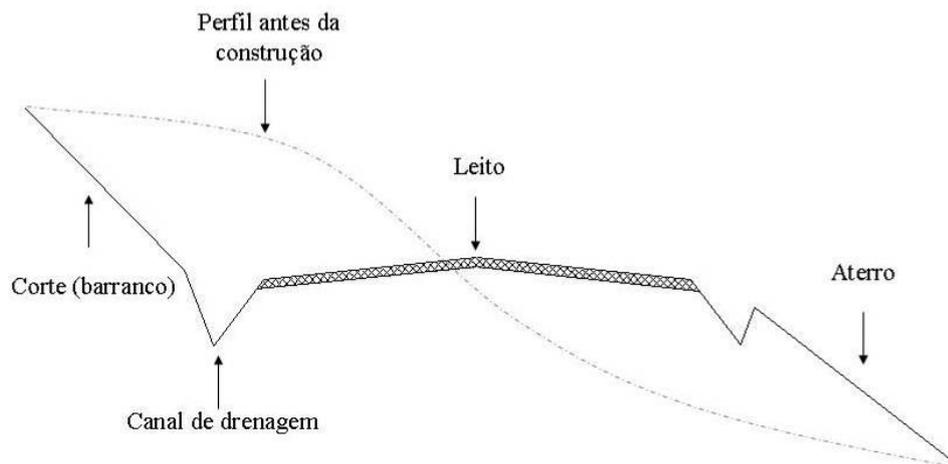


Figura 1 – Componentes da estrada. Modificado de Demarchi *et al.* (2003)

O corte e o aterro são feições decorrentes da modificação realizadas nas vertentes durante a construção da estrada. O corte é resultante da remoção de solo ou rocha necessário para formação da superfície plana do leito. O aterro é resultado da deposição de material, que pode ser o retirado no corte, utilizado para preencher as porções mais baixas do relevo e formar o leito (DEMARCHI *et al.*, 2003). Os canais de drenagem ou sarjetas são dispositivos de drenagem que tem a função de receber escoamento proveniente de componentes da estrada ou de vertentes e podem não aparecer em função da falta de manutenção ou da não construção devido ao tipo de uso da estrada.

Diversos materiais podem ser utilizados para revestimento do leito da estrada. Neste sentido, o tipo de revestimento pode ser utilizado para classificar as estradas

como pavimentada ou não pavimentadas com revestimento primário ou nenhum revestimento (LOPES *et al.* 2002). A estrada pavimentada é caracterizada pelo revestimento com concreto betuminoso (asfáltico) ou concreto com cimento, o que permite o tráfego de veículos durante todo o ano. O revestimento primário consiste na cobertura do leito com material granular (saibros, cascalhos, etc.), o que também permite o tráfego de veículos durante todo o ano. A estrada sem revestimento é aquela que não apresenta qualquer tipo de revestimento, sendo que seu leito é formado pelo material constituinte do solo local com algum grau de compactação.

As estradas não pavimentadas compõem a maior parte da rede viária, sobretudo nos países em desenvolvimento. No Brasil 86,56% da rede viária é composta por estradas não pavimentadas (DNIT, 2009). Em áreas de exploração florestal a densidade de estradas é mais elevada em comparação com outros usos do solo (GOERL *et al.*, 2011). Por haver relação entre a densidade de estradas e impactos ambientais relacionados aos recursos hídricos as estradas nestas áreas são foco de diversos estudos (GUCINSKI *et al.*, 2001).

Além do tipo de revestimentos, as estradas podem ser classificadas com base em diversos critérios de uso, largura e forma. A grande variedade destas características leva a dificuldades de homogeneização na classificação da rede viária (LOPES, S. *et al.*, 2002). As estradas não pavimentadas, sobretudo em empreendimentos florestais, são classificadas pela função de cada trecho sendo divididas em primárias, secundárias e trilhas ou ramais (SANT'ANNA *et al.*, 2000).

As estradas primárias são aquelas com a capacidade de suportar transporte durante o ano todo, e sua principal função é permitir o acesso às áreas de produção florestal e às estradas externas às fazendas. As secundárias ligam as áreas de produção florestal às estradas primárias. Normalmente dividem a área florestal em talhões. Possuem um padrão de construção simples, ficando muitas vezes intransitáveis em períodos de chuva.

As trilhas ou ramais são caminhos nos quais ocorre somente o trânsito de máquinas florestais. São abertos dentro da floresta, muitas vezes somente com o rebaixamento dos tocos e sem a movimentação de terra. São estradas temporárias, tendo como função a redução da distância entre o local de colheita e a estrada secundária.

O conhecimento do tipo de modificação morfológica realizada nas encostas para a construção das estradas permite a identificação dos componentes e dispositivos de drenagem que compõe a faixa da estrada. A seção transversal da

estrada corresponde ao corte perpendicular ao sentido de tráfego. A importância do conhecimento da seção transversal se dá pela variação dos componentes da estrada que tem como consequência características distintas de drenagem e pela identificação de falta de manutenção do leito (EATON *et al.*, 1988). De acordo com Politano *et al.* (1989), são encontrados três tipos de perfis nas estradas: em corte, aterro e misto (Figura 2). As características de drenagem, em relação à direção do escoamento e dispositivos de drenagem, são determinadas pela forma de construção empregada. O tipo de seção, no entanto, é condicionado pelas características do relevo e posição em que a estrada é construída (Figura 3).

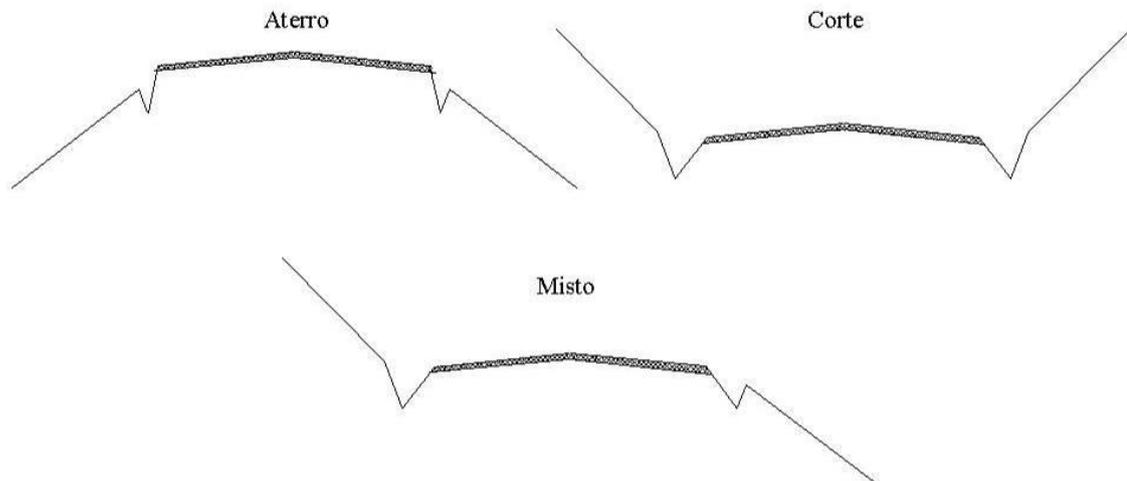


Figura 2 – Seções transversais de estradas

A seção em aterro é caracterizada pela elevação do leito da estrada em relação ao relevo. Este tipo de estrada é utilizado em áreas de relevo plano sujeito a inundação da estrada quando construída em planícies e banhados. A seção em corte, também conhecida como encaixada, consiste na escavação para a construção do leito resultando na formação de barranco de corte nos dois lados do leito. A seção mista apresenta corte e aterro e é característica de trechos construídos em meia-encosta perpendiculares ao sentido do declive.

A forma da seção pode apresentar variações na construção do leito, que pode ter forma abaulada drenando para os dois lados ou apenas para um dos lados. Isso pode ocorrer em qualquer uma das seções com o objetivo de direcionar o escoamento para dispositivos de drenagem (GRIEBELER, 2002).

As diferentes posições da estrada na vertente indicam não apenas as características morfológicas da seção como também a quantidade de escoamento

interceptado pela estrada e potencial erosivo. De acordo com Hudson (1971), as estradas construídas sobre o divisor de águas, necessitam poucas estruturas de drenagem e modificações morfológicas, pois não ocorre contribuição de escoamento de áreas externas à estrada. Desta forma as estradas em divisores são menos afetadas pela erosão. Em contraste a pior situação ocorre nas estradas posicionadas alinhada com o sentido do declive da vertente pela concentração do escoamento e declividades mais acentuadas (FERRAZ *et al.*, 2007).

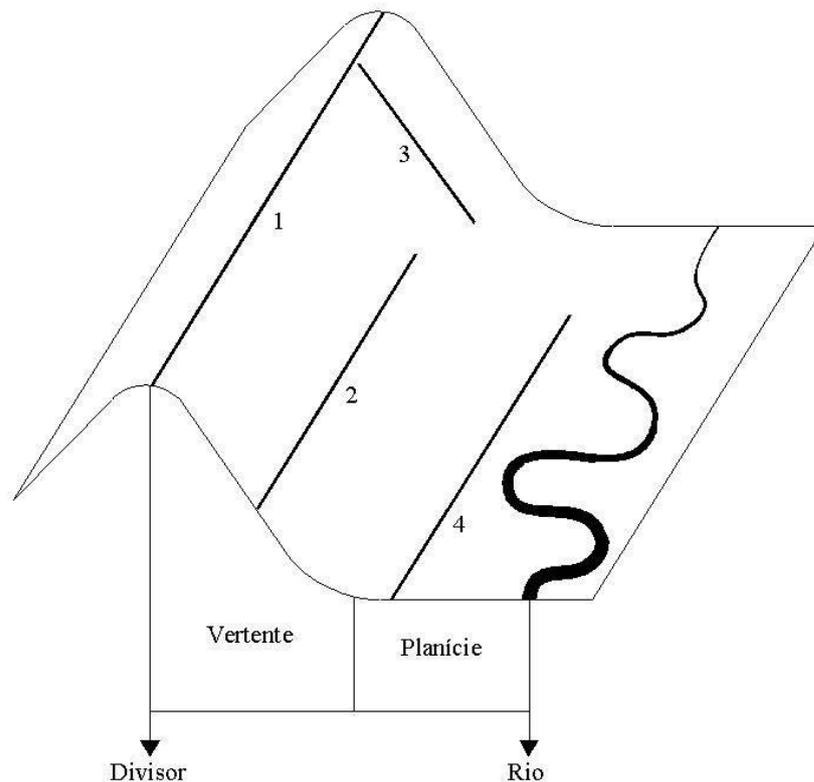


Figura 3 – Posição das estradas nas vertentes: 1) estrada em divisor; 2) estrada na meia-encosta perpendicular ao sentido do escoamento; 3) estrada na encosta no sentido do declive; 4) estrada em planície.

As estradas localizadas em planícies, por apresentarem baixas declividades e proximidade com os rios, estão sujeitas a problemas de drenagem do leito e inundações (FERRAZ *et al.*, 2007). A localização em meia vertente é geralmente caracterizada por baixas declividades e pela seção mista, tendo área de drenagem externa a montante, que podem contribuir com escoamento para a estrada. Neste tipo de estrada, geralmente as estruturas de drenagem contribuem com escoamento para a parcela de encosta a jusante.

Os dispositivos de drenagem são estruturas construídas com o objetivo de drenar o escoamento vindo da estrada. A drenagem da estrada é importante por manter a superfície livre de poças e atoleiros, diminuindo a possibilidade de erosão

causada pelo escoamento sobre a estrada. Em estradas não pavimentadas os dispositivos comumente utilizados são as sarjetas, bueiros, bigodes, lombadas e caixas de contenção (BUBLITZ e CAMPOS, 1992; DEMARCHI *et al.*, 2003). As sarjetas são construídas associadas ao leito da estrada e tem o objetivo de drenar o escoamento proveniente do leito, corte e vertentes à montante e direcioná-lo para um dispositivo que irá servir para dissipação ou acumulação de escoamento, evitando erosão no leito.

Os bigodes ou sangas são dispositivos utilizados para direcionar o escoamento para a vertente. Desta forma a água vinda da estrada é conduzida para uma área em que a capacidade de infiltração é maior.

Os bueiros são geralmente utilizados quando há necessidade de conduzir o escoamento de uma sarjeta ao lado do corte para o lado do aterro, passando por baixo da estrada.

As caixas de contenção são construídas ao lado do leito com o objetivo de captar o escoamento, diminuindo a velocidade do escoamento e armazenando a água e os sedimentos vindos da estrada. Estas estruturas geralmente são dimensionadas para captar, armazenar e infiltrar toda a água do escoamento, constituindo-se portanto em pontos de acumulação dos sedimentos carregados da estrada.

As lombadas são construídas no leito da estrada com o objetivo de segmentar o comprimento de rampa disponível para o escoamento e direcioná-lo para outro dispositivo de drenagem. Desta forma, as lombadas também têm a função de diminuir a velocidade do escoamento segmentando a estrada.

3.2. PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS E O IMPACTO DAS ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

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). Em bacias hidrográficas a produção de sedimentos é dada pelo total de sólidos que é transportado pelo canal fluvial até o exutório.

A produção de sedimentos é um processo natural que ocorre à medida que a esculturação das vertentes e evolução morfológica do sistema fluvial são realizadas no decorrer do tempo, e depende da disponibilização dos sedimentos pela erosão

bruta, e do balanço entre transporte e deposição, que dependem da capacidade de transporte dos sedimentos pelo escoamento (JULIEN, 1995). A erosão bruta ou total em uma área é dada pela soma de todas as formas de erosão de sedimentos (JULIEN, 1995), ou seja:

$$A_t = A_e + A_s + A_m \quad (1)$$

em que A_t é a erosão total (t/ano), A_e é a erosão entre-sulcos (t/ano), A_s é a erosão em sulcos (t/ano) e A_m é a erosão nas margens dos canais fluviais.

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

$$Q_s = A_t \times SDR \quad (2)$$

em que Q_s é a produção de sedimentos (t/ano) e SDR é a taxa de transferência expressa como proporção.

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 inversa entre a taxa de transferência e a área de drenagem (Figura 4) em que a transferência de sedimentos diminui com o aumento da área.

A Figura 5 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

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.

das partículas. No entanto, apesar da mesma velocidade provocar a erosão de partículas de 0,01 e 4 mm, uma menor variação provoca a deposição das partículas maiores. Portanto, os processos relacionados aos sedimentos nas vertentes são dependentes da capacidade de geração de escoamento, de características topográficas que controlam a velocidade do escoamento, e da resistência do solo à erosão.

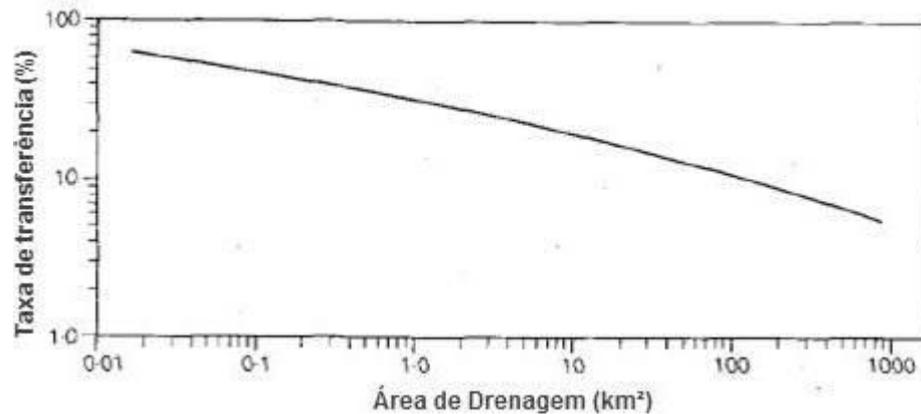


Figura 4 - Relação entre área de drenagem e taxa de transferência (WALLING, 1983)

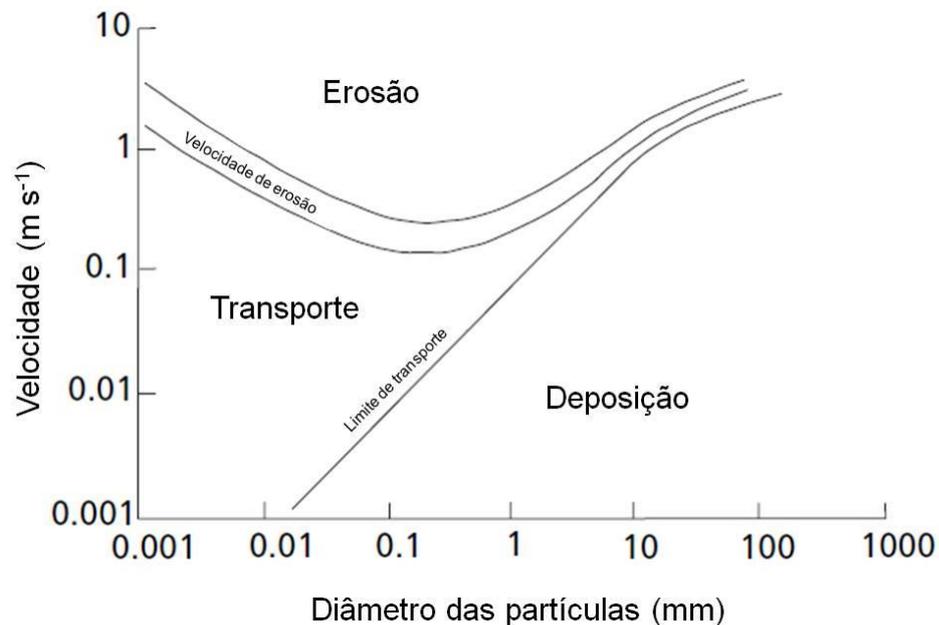


Figura 5 - Velocidade da água para erosão, transporte e deposição de sedimentos em função do tamanho das partículas (MORGAN, 2005)

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 pelas características da chuva, bem como pela cobertura do solo pela vegetação que age como proteção da superfície diminuindo a erosão (LAL, 2001).

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).

Neste trabalho a desagregação e remoção de partículas da superfície será denominada erosão, enquanto o material transportado até determinado ponto será tratado como produção de sedimento da área de drenagem à montante. Em específico no caso das estradas, o material transportado até o local de medição de sedimentos será denominado produção de sedimentos de estrada, empregando a terminologia comumente encontrada na literatura (LUCE e BLACK, 1999; RAMOS SCHARRÓN, 2010; REID e DUNNE, 1984; ZIEGLER *et al.*, 2000).

3.3. PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

As modificações na cobertura do solo têm efeito sobre a ocorrência dos processos hidrossedimentológicos. Este efeito atua na distribuição espacial dos processos ao passo que a porção modificada apresenta resposta hidrológica diferente, resultando em uma modificação no potencial de gerar escoamento e sedimentos. A extensão da área e o grau de modificação determinam o efeito que será observado na vazão e no transporte de sedimentos (CHOW *et al.*, 1988).

Ao considerar as estradas não pavimentadas como uma modificação desta natureza torna-se importante verificar o efeito que produz na geração de escoamento e produção de sedimentos. O processo de construção do leito da estrada tem como objetivo obter uma superfície com poucas irregularidades e com um sistema de drenagem que dificulte o acúmulo de água no leito da estrada. Desta forma pressupõe a retirada da cobertura vegetal, modificação do solo e da forma da vertente (LUCE, 2002).

A compactação da superfície modifica consideravelmente a capacidade de infiltração tornando a estrada um local que favorece a ocorrência de escoamento superficial hortoniano (SIDLE *et al.*, 2004). A compactação do leito da estrada diminui consideravelmente a condutividade hidráulica, variando de 0,1 a 3 mm/h (LUCE e CUNDY, 1994), enquanto em superfícies não alteradas de florestas é aproximadamente 80 mm/h (ELLIOT *et al.*, 1999). Desta forma em áreas nas quais

predomina a cobertura do solo por florestas, as estradas são as únicas superfícies em que o escoamento superficial hortoniano é predominante. Conseqüentemente, devido ao aumento do escoamento superficial, ocorre maior erosão nas estradas não pavimentadas quando comparadas às superfícies não alteras.

Além de possuir maiores taxas de erosão, as estradas não pavimentadas tem a característica de definir caminhos preferências de fluxo superficial, conduzindo o escoamento e sedimentos para os canais de drenagem (JONES *et al.* 2000; CROKE e MOCKLER, 2001; HAIRSINE *et al.*, 2002). Os caminhos são aqueles construídos como estruturas de drenagem com função de retirar a água o leito da estrada. Neste sentido, as estradas não pavimentadas proporcionam conexão direta com os canais de drenagem transferindo proporções maiores de escoamento e sedimentos.

Tabela 1 – Importância das estradas não pavimentadas na produção de sedimentos

Localização	Precipitação anual (mm)	Área da bacia (Km ²)	Densidade de estradas (Km/Km ²)	Sedimentos de estradas (%) ¹	Área ocupada (%)	Método	Fonte
Brasil - Região Sul	1500	1,68	-	28,1	-	Traçadores	Minella <i>et al.</i> (2007)
Brasil - Região Sul	1600	1,19	-	37,6	-	Traçadores	Minella <i>et al.</i> (2007)
Brasil - Região Sul ²	1600	0,57	-	36	3	Traçadores	Minella <i>et al.</i> (2009)
Brasil - Região Sul	1953,8	1,1	3,8	46,5	1,6	Monitoramento	Thomaz <i>et al.</i> (2011)
Austrália - Região Sudoeste	700 a 1100	2100	1	82	-	Modelagem	Fu <i>et al.</i> (2009)
Austrália - Região Sudoeste	700 a 1100	1500	0,75	34	-	Modelagem	Fu <i>et al.</i> (2009)
Austrália - Região Sudoeste	1000 - 1800	65	0,9	12 a 25	0,45	Traçadores	Motha <i>et al.</i> (2003)
Reino Unido	-	15	-	30	-	Modelagem	Gruszowski <i>et al.</i> (2003)

¹ Proporção em relação à produção de sedimentos da bacia

² O estudo de Minella *et al.* (2009) foi realizado em uma sub-bacia da área estudada em Minella *et al.* (2007)

³ Informação não presente na fonte consultada

As estradas não pavimentadas compõem uma pequena proporção da área das bacias hidrográficas, no entanto, devido principalmente às altas taxas de erosão e a

conectividade com a rede de drenagem, contribuem com proporção expressiva de sedimentos (ZIEGLER e GIAMBELLUCA, 1997). Este efeito das estradas no comportamento hidrossedimentológico, que reforça a relevância das estradas, tem sido abordado em diversos estudos. Na Tabela 1 são apresentados exemplos de estudos da produção de sedimentos em bacias hidrográficas que consideraram as estradas. Percebe-se que as estradas ocupam pequenas proporções das áreas de estudo e, no entanto, contribuem com proporções entre 24 e 82% do total da produção de sedimentos.

3.3.1. Erosão em estradas não pavimentadas

A disponibilização de sedimentos pela erosão ocorre de forma diferenciada em cada porção da paisagem. As estradas não pavimentadas representam modificações morfológicas que facilitam a ocorrência da erosão. A erosão em estradas não pavimentadas ocorre em seus próprios componentes e em encostas que recebem escoamento vindo das estradas. Em Wemple *et al.* (2001) são apresentadas os tipos de erosões associadas às estradas (Figura 6) que ocorreram após um evento extremo de precipitação (290 mm em 5 dias). Foram identificados processos que ocorrem na área de drenagem externa à estrada e processos produzidos na própria estrada.

Na área de drenagem a montante da estrada foram identificados movimentos de massa e processos fluviais causados em períodos de enchente. Estes processos não são causados pela estrada, no entanto são responsáveis por depositar sedimentos sobre ela.

Os processos na estrada são aqueles que ocorrem nos elementos que formam a estrada, que são o leito, canal de drenagem, o barranco de corte e o aterro. Nestes elementos Wemple *et al.* (2001) identificou escorregamentos e ravinamentos. Os escorregamentos ocorrem nas áreas de corte e aterro e as ravinas são formadas nas áreas de maior convergência do escoamento superficial no canal de drenagem da estrada e nas vertentes que recebem escoamento vindo da estrada.

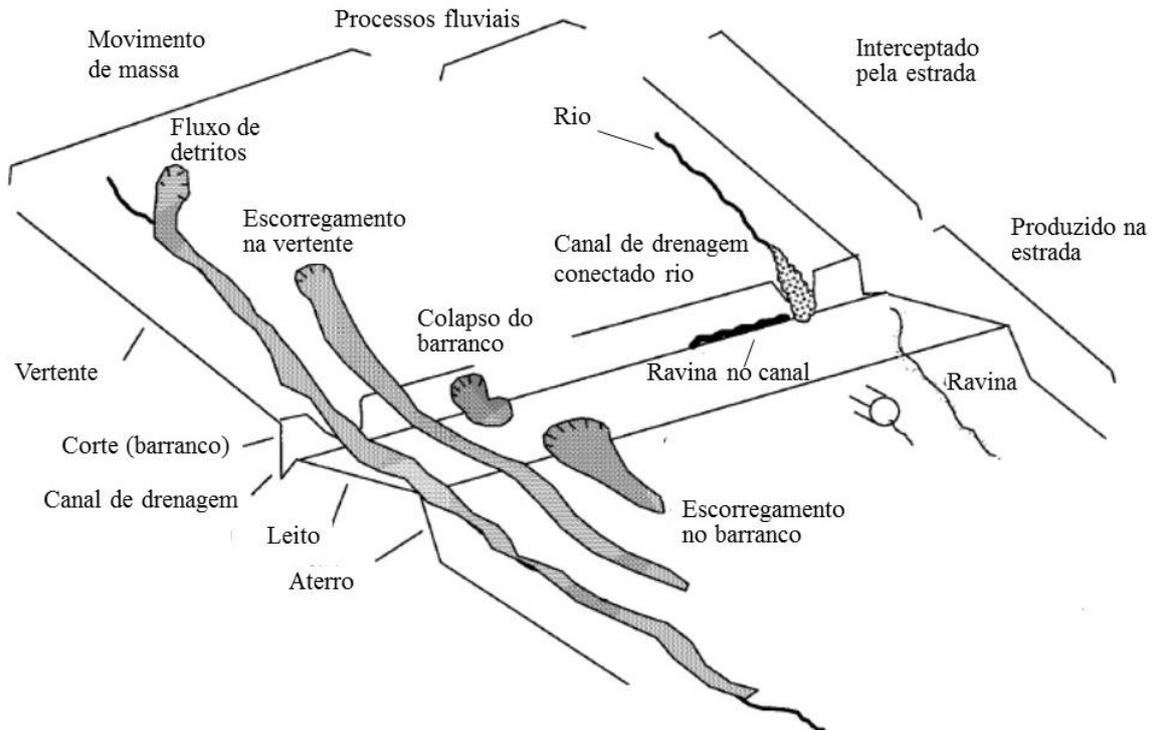


Figura 6 - Erosões relacionadas à estrada não pavimentada. Modificado de Wemple *et al.* (2001)

Os movimentos de massa que são interceptados pelas estradas ocorrem apenas em condições de precipitação elevada e em áreas com declividade e área de contribuição determinadas (MONTGOMERY, 1994). Portanto, apesar de importância em volume de material erodido, torna-se menos relevante em áreas que não possuem características geomorfológicas que favorecem tais processos. Neste caso a erosão ocorre nos barrancos e no leito da estrada, tornando estas áreas de maior importância (JORDÁN-LÓPEZ *et al.*, 2009; SIDLE *et al.*, 2004; THOMAZ *et al.*, 2011).

Nos barrancos a erosão ocorre por efeito do salpicamento e escorregamentos. O salpicamento é evidenciado pela formação de pedestais em que o topo fica protegido do impacto das gotas por algum material resistente, como fragmentos de rocha (SIDLE *et al.*, 2004). Os escorregamentos nos barrancos podem ocorrer devido aos constantes ciclos de umedecimento e ressecamento, e consequente expansão e contração que provoca o colapso do material sob ação da gravidade (THOMAZ *et al.*, 2011). No entanto, Ramos-Scharrón e MacDonald (2007), afirmam que na ausência de escorregamentos, os barrancos são irrelevantes comparados a erosão que ocorre no leito da estrada.

O leito e os canais de drenagem das estradas são as áreas onde a erosão ocorre de forma mais expressiva. Isso se dá pela geração de escoamento na própria superfície e pela interceptação do escoamento superficial e subsuperficial, ocorrendo

grande potencial de erosão e transporte de sedimentos (MACDONALD *et al.*, 2001). Os processos erosivos no leito das estradas são influenciados por fatores morfológicos e uso e manutenção da estrada.

Os fatores morfológicos mais importantes são o comprimento e a declividade da estrada, que controlam a energia do escoamento (LUCE e BLACK, 1999; MACDONALD *et al.*, 2001). A declividade transversal da estrada é também importante por evitar o escoamento concentrado no centro da estrada e conseqüentemente dificultar a formação de erosão em sulcos.

O uso da estrada refere-se à frequência e o tipo de veículo que trafegam sobre ela. Em estudo sobre o efeito do uso das estradas Reid e Dunne (1984) concluíram que um trecho de estrada com tráfego pesado de caminhões pode apresentar produção de sedimentos cem vezes maior que em uma estrada abandonada. A passagem de veículos é responsável por desagregar material do leito da estrada que permanecem depositados até ocorrer transporte pelo escoamento. Desta forma a erodibilidade da superfície da estrada passa a ser variável e dependente das características do material depositado no leito e do próprio leito (ZIEGLER *et al.*, 2001a). Este suprimento de sedimentos depositados, pouco resistente ao transporte, pode ser mobilizado por quantidades pequenas de escoamento ocasionando a redução da quantidade de sedimentos transportados ao longo de eventos, mesmo com o aumento do escoamento, pela diminuição desses depósitos.

3.3.2. Adequação de estradas não pavimentadas

Tendo em vista os danos causados pelo escoamento sobre a estrada e o impacto sobre o sistema de drenagem natural é realizada a adequação de estradas não pavimentadas com objetivo de controlar o volume e a velocidade de escoamento (BUBLITZ e CAMPOS, 1992). Neste sentido, a adequação é realizada com a construção de estruturas de drenagem que possibilitem a diminuição da erosão e da transferência de sedimentos para os rios. Assim, as caixas de contenção são geralmente utilizadas por cumprir a função de captar o escoamento da estrada, evitando a erosão, a armazenar água e sedimentos, diminuindo a influência das estradas sobre os rios.

De acordo com Bertolini *et al.* (1994) o espaçamento mínimo entre caixas de contenção, independente da declividade, deve ser de 40 m e os espaçamentos máximos de 120 m para declividades entre 0 e 5%, 100 m entre 5 e 10%, 80 m para declividades entre 10 e 15% e de 60 m para declividades entre 15 e 20%.

Na recomendação de espaçamento de Bublitz e Campos (1992) as caixas de contenção aparecem com maior frequência, sendo que para declividades inferiores a 5%, de 5 a 10% e superiores a 10%, os espaçamentos devem ser de 35, 30 e 25 m, respectivamente.

Outra forma de diminuir o impacto das estradas é a remoção de trechos de estradas não utilizados. Esta prática é utilizada pelo fato de o simples abandono da estrada, mesmo após o crescimento de vegetação, não ser suficiente para a recuperação da capacidade de infiltração e conseqüentemente não recuperando a área da estrada (FOLTZ *et al.*, 2009).

Essa prática de remoção de estrada inclui a descompactação do leito e a estabilização de cortes para a recuperação de condições de drenagem anteriores a construção da estrada diminuindo a ocorrência de erosão (LUCE, 1997; MADEJ, 2001).

3.4. MONITORAMENTO DE PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

Apesar das possibilidades proporcionadas pela utilização de modelos a aquisição de dados é indispensável. A importância dos dados se dá pela necessidade de compreender os fatores que influenciam a ocorrência dos processos hidrossedimentológicos, criação e validação dos modelos.

Estudos recentes sobre a ciência hidrológica demonstram uma tendência de ênfase na modelagem e pouco desenvolvimento na aquisição de dados, por meio de ensaios e monitoramento (SIDLE, 2006; SILBERSTEIN, 2006). Neste sentido, Beven (2002) analisa o desenvolvimento da hidrologia e confirma esta tendência e afirma que o futuro desenvolvimento nesta área depende do aperfeiçoamento e ampliação das técnicas de aquisição de dados.

Tabela 2 – Métodos utilizados no monitoramento da produção de sedimentos em estradas não pavimentadas

Discretização temporal	Método	Princípio	Variáveis medidas	Limitações	Exemplo de aplicação
Acumulado ¹	Pinos de erosão	Variação volumétrica	Sedimentos ²	Movimentação e soterramento dos pinos	Thomaz <i>et al.</i> (2011)
Acumulado	Volume de feições erosivas	Volume erodido	Sedimentos	Baixa acurácia	Sidle <i>et al.</i> (2004)
Acumulado	Barreira têxtil (<i>Fence</i>)	Variação volumétrica	Sedimentos	Pode ocorrer perda de silte e argila	Ramos-Scharrón e MacDonald (2007a); Robichaud e Brown (2002)
Acumulado	Reservatório - com retirada de amostra	Concentração de sedimentos	Sedimentos e escoamento	Incerteza na retirada de amostra do reservatório	Macdonald <i>et al.</i> (2001); Garcia <i>et al.</i> (2003); Nikkami (2012)
Acumulado	Reservatório - massa do conjunto	Massa específica dos sedimentos	Sedimentos	Necessita de balança de grande porte	Luce e Black (1999)
Acumulado	Amostrador <i>Coshocton</i>	Concentração de sedimentos em amostra reduzida	Sedimentos e escoamento	-	Swift (1984); Grayson <i>et al.</i> (1993); Corrêa e Dedecek (2008)
Evento	Calha associada a sistema de bombeamento	Nível de escoamento e concentração de sedimentos	Sedimentos e escoamento	Alto custo	Kahklen (2001)
Evento	Calha associada a coletas manuais	Nível de escoamento e concentração de sedimentos	Sedimentos e escoamento	Dificuldade de realizar coletas durante eventos de precipitação	Ramos-Scharrón e MacDonald (2007b)
Evento	Monitoramento em canal fluvial interceptado por estrada	Diferença nos parâmetros medidos a montante e jusante da estrada	Sedimentos e escoamento	Não possibilita monitoramento de qualquer trecho. Sujeito a influência da dinâmica do canal fluvial.	Lane e Sheridan (2006)
Misto	Cubas basculantes associadas a reservatório	Vazão por método volumétrico e concentração de sedimentos	Sedimentos e escoamento	-	Forsyth <i>et al.</i> (2006); Sheridan <i>et al.</i> (2006)

¹ Total do evento acumulado entre duas medições consecutivas. ² Nesta classificação não foi feita discriminação entre a medição da erosão local e do sedimento transportado

Nas estradas o monitoramento tem como objetivo conhecer a intensidade dos processos que podem comprometer a qualidade da estrada e causar impactos ambientais. Desta forma diversos estudos enfocam na produção de sedimentos e adicionalmente no escoamento superficial, gerados pela precipitação, possibilitando avaliar o efeito de diversas condições de pavimento, drenagem e forma (FU *et al.*, 2010).

São encontradas na literatura diversas formas de realizar o monitoramento (Tabela 2). Estes métodos se diferenciam principalmente pela discretização temporal da aquisição de dados e pela possibilidade de medir escoamento juntamente com a produção de sedimentos.

Os métodos baseados em eventos possibilitam identificar as variações no transporte de sedimentos ao longo do evento de precipitação e desta forma podem ser utilizados para estudar de forma detalhada os processos envolvidos. Nos métodos baseados em amostra acumulada o menor período representado é o acumulado durante um evento. Este tipo de dados é bastante utilizado para determinar taxas anuais de produção de sedimentos (FU *et al.*, 2010). Os métodos denominados mistos são compostos por um dispositivo de medição do escoamento baseado em evento e outro com o fim de acumular os sedimentos.

3.5. MODELAGEM DE PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

A modelagem matemática é amplamente utilizada na previsão do escoamento e produção de sedimentos em bacias hidrográficas. Os modelos trazem a vantagem de possibilitar a avaliação de cenários que representam condições anteriores ou futuras da área de estudo.

Os modelos utilizados em estudos de produção de sedimentos em estradas não pavimentadas são apresentados na Tabela 3. De acordo com Fu *et al.* (2010) os modelos utilizados na simulação da erosão em estradas são divididos em empíricos e fisicamente baseados. Os modelos empíricos são aqueles elaboradas a partir da observação do processo e da relação estatística das observações com variáveis que se correlacionam. Os modelos fisicamente baseados simulam infiltração e propagação do escoamento e utilizam equações de conservação de energia ou massa para

descrever os processos de erosão e transferência de sedimentos com grande nível de detalhe (MERRITT *et al.*, 2003).

A quantidade de dados necessária para a simulação da erosão em modelos empíricos e fisicamente baseados é bastante diferente. A complexidade dos modelos fisicamente baseados demanda maior quantidade de dados de entrada para a simulação. Ao paço de tempo das séries observadas é também mais complexa exigindo atividade de monitoramento específico.

Tabela 3 – Modelo utilizados para simulação de erosão em estradas

Modelo	Desenvolvido para aplicação em estrada	Classificação	Escala temporal	Escala espacial	Fonte/Aplicação
WARSEM	Sim	Empírico	Anual	Rede viária	Dubé <i>et al.</i> (2004)
USLE/ RUSLE	Não	Empírico	Médias anuais	Rede viária	Megahan <i>et al.</i> (2001)
MUSLE	Não	Empírico	Evento cumulado	Segmento de estrada	Sheridan <i>et al.</i> (2006)
STJ-EROS	Sim	Empírico	Médias anuais	Rede viária	Ramos-Scharrón e MacDonald (2007c)
WEPP	Não	Fisicamente baseado	Médias anuais	Rede viária	Elliot <i>et al.</i> (1999)
KINEROS2	Não	Fisicamente baseado	Evento	Parcela/pequenas bacias	Ziegler <i>et al.</i> (2001b)
GA-UH e GA KW com curva chave	Não	Fisicamente baseado e empírico	Evento	Segmento de estrada	Ramos-Scharrón e MacDonald (2007c)
ROADMOD	Sim	Empírico	Médias anuais	Rede viária	Anderson e MacDonald (1998)
TOPOG	Não	Fisicamente baseado	Evento	Pequenas bacias	Croke e Nethery (2006)
LISEM	Sim	Fisicamente baseado	Evento	Pequenas bacias	Hölzel e Dieckrüger (2012)
ESTRADAS	Sim	Fisicamente baseado	Evento	Segmento de estrada	Griebeler <i>et al.</i> (2002)
SEDMODL2	Sim	Empírico	Médias anuais	Segmento de estrada	Surfleet <i>et al.</i> (2011)
GRAIP	Sim	Empírico	Médias anuais	Rede viária	Prasad <i>et al.</i> (2005)
SWAT	Não	Fisicamente baseado	Séries diárias	Bacia hidrográfica	Schultz <i>et al.</i> (2012a)

Os modelos empíricos possibilitam o conhecimento de taxas anuais de erosão nas estradas. Desta forma são utilizados, principalmente, no planejamento e gestão de redes viárias, possibilitando identificar dentro desta, os trechos com maiores taxas

de erosão e transferência de sedimentos. Por outro lado, os modelos fisicamente baseados são utilizados para descrever a variação no tempo e no espaço do escoamento e produção de sedimentos durante os eventos, e são utilizados para estudos com objetivo de conhecer os processos envolvidos (FU *et al.*, 2010).

Na modelagem de processos hidrossedimentológicos em estradas observa-se que alguns dos modelos utilizados não foram originalmente desenvolvidos para a aplicação em estradas. Entre eles estão USLE, WEPP e KINEROS2. Existem também outros modelos desenvolvidos para a previsão da erosão em escala de bacia hidrográfica, que apesar de não terem sido utilizados em estradas, características semelhantes ao apresentados anteriormente. Como exemplo de modelos que podem ser utilizados para a descrição da produção de sedimentos em estradas cita-se o LISEM e o EUROSEM.

No caso dos modelos fisicamente baseados a aplicação em estradas é especialmente relevante, tendo em vista, a complexidade da descrição dos processos e a possibilidade de identificar especificidades não previstas na concepção do modelo.

Um exemplo disto é o trabalho desenvolvido por Ziegler *et al.* (2001b) que utilizando o modelo KINEROS2 identificou a deficiência do modelo em representar o pico inicial de produção de sedimentos.

Neste sentido, os modelos de erosão concebidos para pequenas áreas de drenagem possibilitam sua aplicação em trechos de estradas visando a identificação das porções e componentes das estradas que mais contribuem para a produção de sedimentos (FU *et al.*, 2010).

No Brasil a utilização de modelos para simular escoamento e produção de sedimentos em estradas é incipiente e se concentra na aplicação de modelos de previsão de média de longo período como o WEPP utilizado em Machado *et al.* (2003) e RUSLE em Corrêa *et al.* (2008). Aplicações enfocadas as estradas em sua relação com a bacia hidrográfica com os modelos SWAT e GRAIP são encontradas nos trabalhos de Schultz *et al.* (2012a) e Schultz *et al.* (2012b) respectivamente. Na simulação de evento em âmbito nacional destaca-se o desenvolvimento do modelo ESTRADAS por Griebeler *et al.* (2002) que tem como o objetivo o dimensionamento de caixas de contenção e determinação de espaçamento.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. ÁREA DE ESTUDO

A bacia experimental do rio Sagui está localizada no município de Rio Negrinho/SC e possui área de drenagem de 24 ha. Na região predomina o clima do tipo Cfb, da classificação de Köppen (1936), que se caracteriza por ser temperado, constantemente úmido, sem estação seca e com verão fresco (temperatura média do mês mais quente < 22°C). A temperatura média anual varia de 15,5°C a 17°C, a precipitação pluviométrica total anual variando de 1.360 a 1.670 mm, com o total anual de dias de chuva entre 138 e 164 dias. A umidade relativa do ar pode variar de 80 a 86% (EPAGRI/CIRAM, 2006).

A bacia está localizada em uma área de reflorestamento de *Pinus taeda*. A colheita foi iniciada no dia 13/03/2011 e duração de aproximadamente uma semana, modificando o uso do solo que ficou caracterizado por 89,8% de solo exposto (com novas mudas de *Pinus taeda*), 8,3% de mata ciliar e 1,9% de estradas.

As estradas presentes no entorno da bacia totalizam 2089m de comprimento e podem ser divididas em três trechos distintos (Figura 7). O trecho 1, definido como estrada secundária, é caracterizado por declividade acentuada, descendo do divisor de águas até a drenagem, com rampa longa e leito sem revestimento. Na porção inicial deste trecho 1, de montante (Figura 8A), foram identificados problemas de drenagem e erosão do leito, e na porção final (Figura 8B) erosão acentuada com formação de ravinas e contribuição de sedimentos diretamente conectados com o rio. O trecho 2 é do tipo estrada primária, localiza-se no divisor de águas, possui baixa declividade e leito revestido com cascalho, não apresentando erosão (Figura 8C). O trecho 3 é do tipo estrada secundária e encontra-se em meia encosta e, portanto, possui área de drenagem externa. Nas áreas de maior declividade e extensão presentes neste trecho foram identificados processos erosivos ocorrendo na estrada e sarjeta (Figura 8D).

As fotos apresentadas na Figura 8 representam a situação das estradas após a atividade de colheita da madeira e anterior a readequação para implantação das parcelas estudadas.

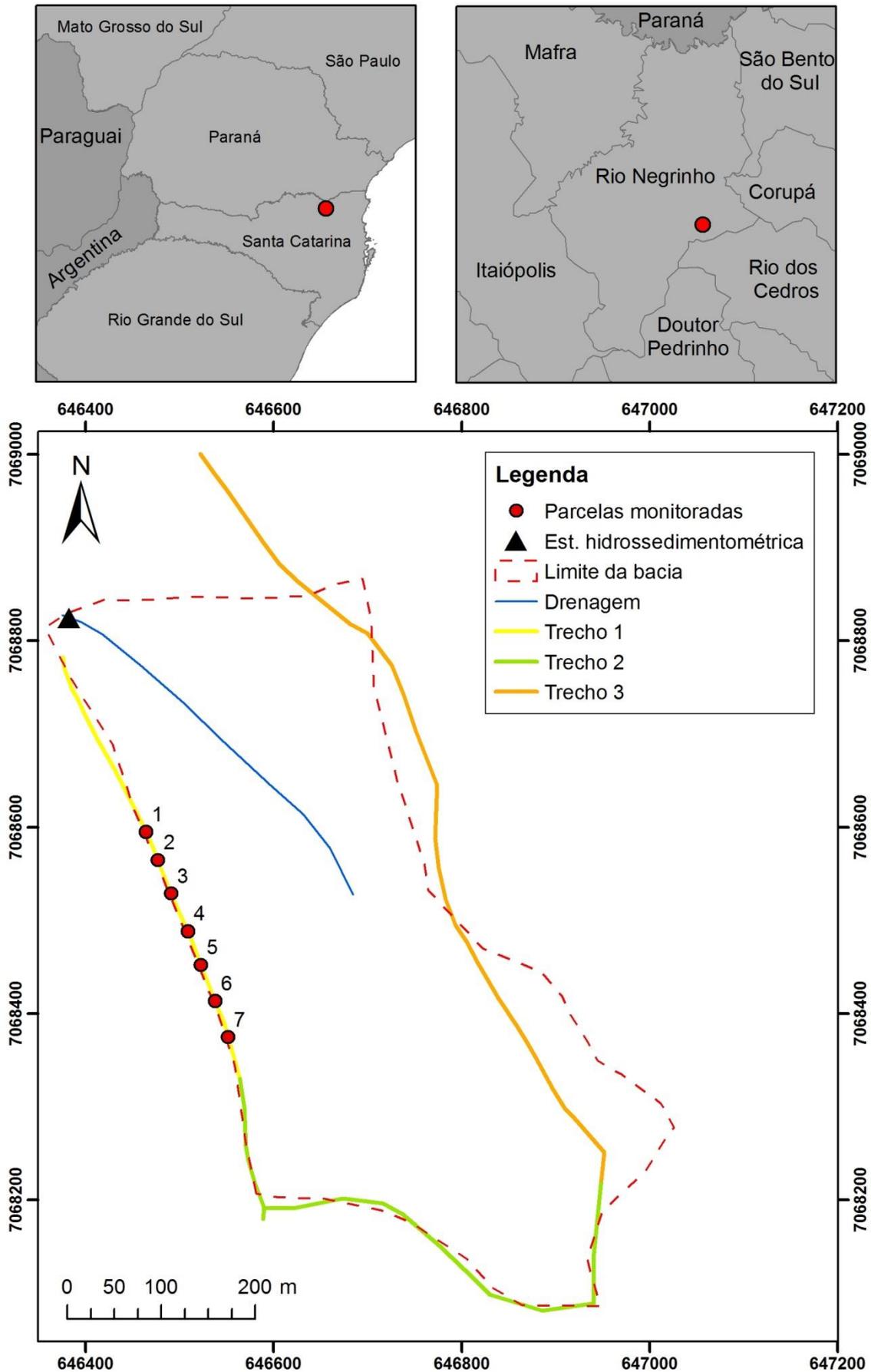


Figura 7 – Estradas da bacia experimental



Figura 8 – Ilustração dos trechos de estrada presentes na área de estudo. A) Porção inicial do trecho 1; B) Porção final do trecho 1; C) Trecho 2; D) Trecho 3

4.2. DELIMITAÇÃO DE ÁREA DE ESTUDO

Foi realizado levantamento topográfico para reconhecimento das estradas e estruturas de drenagem que se localizam no entorno da bacia experimental do rio Sagui. Este levantamento foi realizado utilizando um Nível topográfico Leica Sprinter 150M, e GPS GeoExplorer XT – Trimble com precisão sub métrica.

Sete parcelas foram instaladas no trecho 1 (Figura 7). Este trecho foi escolhido por apresentar características com maior potencial de erosão, com conformação no sentido do declive, conexão com o rio, e apresentar variações na declividade, que permitem delimitar parcelas com variação nesta condição. Em cada uma das parcelas foi realizado levantamento topográfico com estação total Leica TS02, visando descrever as formas do leito e barrancos da estrada.

Foi convencionada a delimitação de parcelas de 40m de comprimento (Figura 9). Cada parcela drena em direção à uma caixa de contenção. As parcelas foram isoladas em suas extremidades por lombadas construídas com o solo removido na construção das caixas (Figura 10). Desta forma o trecho dividido em 7 parcelas, numeradas de jusante para montante, com padrão de espaçamento, e declividades que variam de 2,4 a 9,4%.

Não foi utilizado isolamento lateral no leito da estrada, desta forma, são considerados todos os componentes da estrada, como canais laterais e barranco de corte.

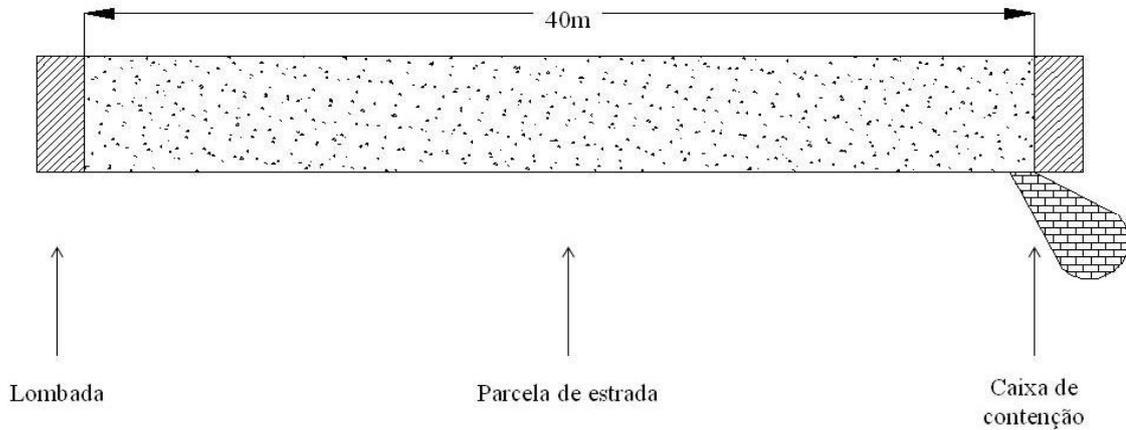


Figura 9 – Componentes da parcela experimental



Figura 10 – Exemplo de parcela de estrada considerada

Visando a adequação da estrada do trecho 1, além da construção das lombadas e caixas de contenção, na porção final foi construída uma barreira interrompendo a estrada (Figura 11A e B). O trecho a jusante da barreira passou por readequação topográfica e descompactação da área do leito, sendo desativado como estrada e a área incorporada ao plantio florestal.

O leito da estrada, no trecho em que foram delimitadas as parcelas, passou por manutenção para obter conformação abaulada e retirar feições erosivas (Figura 11C

e D). Essa manutenção do leito consistiu no nivelamento de confecção de canais laterais de drenagem utilizando apenas o solo presente na área não havendo aplicação de cascalho para recobrimento do leito.

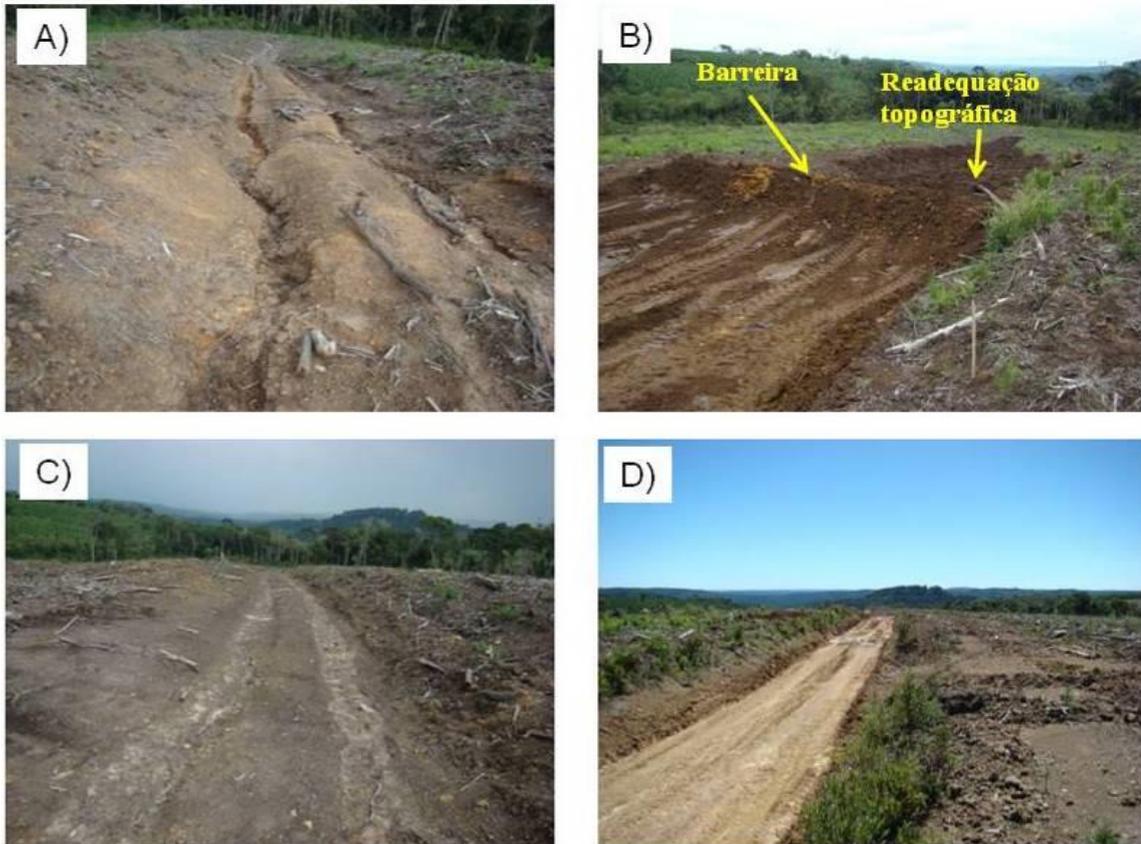


Figura 11 – Trecho experimental antes e depois da adequação. A) Trecho final com erosão; B) Trecho final com interrupção e readequação de segmento desativado; C) Trecho com rebaixamento de leito; D) Trecho com reconformação do leito

4.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DAS PARCELAS

4.3.1. Granulometria

A determinação da distribuição granulométrica do material realizada para cada parcela e caixa de contenção. Desta forma é possível material utilizado na construção da estrada e os sedimentos transportados. A amostragem privilegiou a coleta de material na superfície do leito das parcelas tendo sido realizado na profundidade entre 0 e 10 cm. Dentro das caixas a amostragem foi realizada de forma integrada com maior profundidade para evitar a coleta de material separado durante a decantação dos sedimentos.

A análise granulométrica do material foi realizada no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR/UFPR). A curva granulométrica das partículas com diâmetro inferior a 0,18 mm foi elaborada com granulômetro laser CILAS 1064. As partículas com diâmetro superior a 0,18 mm foram separadas por meio de peneiramento.

4.3.2. Ensaio de Infiltração e condutividade hidráulica saturada

O ensaio de infiltração foi realizado utilizando o procedimento dos anéis concêntricos (CAUDURO e DORFMAN, 1986). Este ensaio consiste na inserção de dois cilindros em profundidade de 10 cm, denominados externo e interno com dimensões de 50 e 30 cm respectivamente (Figura 12a) e observação do nível de água no cilindro interno em intervalos de tempo regulares. As observações foram realizadas até que ocorrer a estabilização da taxa de infiltração. Foram realizadas três repetições dos ensaios no leito das parcelas 1 e 5 e duas repetições ao lado da parcela 5 para caracterização a infiltração da área de reflorestamento.



Figura 12 – Ensaio de características hídricas da área de estudo. a) Ensaio de infiltração utilizando anéis concêntricos; b) Ensaio de condutividade hidráulica saturada com o método do poço indireto.

A determinação da velocidade final de infiltração, conhecida como velocidade básica de infiltração (VIB), baseia-se na premissa de que a partir do início do ensaio a capacidade de infiltração da água no solo diminui em função do tempo e tende a um valor constante. Comumente os valores do ensaio apresentam uma tendência de estabilização, no entanto, faz-se necessário a utilização de modelos de infiltração para melhor determinação do valor da VIB bem como descrever o decréscimo da taxa de infiltração.

Neste trabalho, os modelos de Kostiakov e Horton foram utilizados. Estes dois modelos são empíricos e têm seus parâmetros ajustados aos dados ensaiados (Libardi, 2005). O ajuste dos parâmetros foi realizado com o método mínimos desvios quadrados, utilizando a função *Solver* do *MS Excel*.

O modelo de Kostiakov assume que o decréscimo da taxa de infiltração ocorre segundo uma função potencial negativa:

$$i = i_i t^{-a} \quad (1)$$

em que i é a taxa de infiltração; i_i é a taxa de infiltração inicial; t é o tempo e a é uma constante. A função potencial utilizada neste modelo apresenta a desvantagem de i tender a 0 quando t tende a ∞ .

O modelo de Horton assume que o decréscimo da taxa de infiltração ocorre segundo uma função exponencial e tende a estabilizar quando atinge a taxa final de infiltração (i_f).

$$i = i_f + (i_i - i_f)e^{-kt} \quad (2)$$

em que i_f é a taxa de infiltração final e k é uma constante.

A condutividade hidráulica foi também determinada com o ensaio do poço invertido CAUDURO E DORFMAN, (1986). Este ensaio foi realizado para confirmar os valores de condutividade hidráulica determinados pelo ensaio de infiltração nas parcelas 1 e 5. Este ensaio é realizado em um poço feito a trado, e enchido de água repetidas vezes até atingir a saturação. A partir do início do ensaio é anotado o decréscimo no nível do poço por intervalo de tempo. A condutividade hidráulica saturada do poço é calculada por:

$$K_{fs} = 1,15 \cdot r \cdot \tan \alpha \cdot 864 \quad (3)$$

em que K_{fs} é a condutividade hidráulica saturada do poço (m.dia^{-1}); r é o raio do poço (cm). A grandeza $\tan \alpha$ corresponde á declividade da reta resultante da linearização dos dados ensaiados e podem ser calculados por:

$$\tan \alpha = \frac{\log\left(h_{i(1)} + \frac{r}{2}\right) - \log\left(h_{i(2)} + \frac{r}{2}\right)}{t_{i(2)} - t_{i(1)}} \quad (4)$$

em que h_i é a coluna de água no poço para cada leitura (cm).

4.3.3. Densidade do depósito de sedimentos e do solo e porosidade total

A densidade do solo do leito das parcelas 1 e 5, da área com plantio de *Pinus taeda* ao lado das parcelas (área externa), e dos depósitos de sedimentos dentro das caixas de contenção foi determinada por meio de coleta de amostras indeformadas em cilindros, com volume de 100 cm³. Foram coletadas duas amostras para cada local. As amostras foram secas em estufa a 105° C por 48 horas e posteriormente pesadas. A densidade do solo seco (D_{ss}) foi então determinada pela equação:

$$D_{ss} = \frac{m_s}{V_c} \quad (5)$$

em que m_s é a massa do solo seco (g) e V_c é o volume do cilindro (cm³).

A porosidade total foi também determinada utilizando amostras indeformadas. As amostradas foram saturadas, pesadas e secas em estufa e pesadas novamente. Conhecendo o volume do cilindro e considerando a massa específica da água igual a 1g/cm³ a porosidade total (α) foi determinada pela seguinte relação:

$$\alpha = \frac{V_{\text{agua}}}{V_c} \quad (6)$$

em que V_{agua} é o volume de água presente na amostra (cm³).

4.4. PRODUÇÃO ACUMULADA DE SEDIMENTOS

4.4.1. Produção acumulada com adequação

Em cada parcela delimitada foi realizado o monitoramento da produção de sedimentos acumulada por meio de levantamento topográfico detalhado das caixas de contenção utilizando estação total Leica TS02. Estes dados foram trabalhados no

software *ArcGIS* 9.2 com a extensão 3D Analyst, para obter modelos digitais de elevação (MDE). Na Figura 13 é apresentada uma visualização tridimensional de dois MDEs entre períodos em que ocorreu deposição, sendo que a parte vermelha representa a superfície no tempo inicial e a parte verde a superfície após a ocorrência do depósito, evidenciando a diferença na profundidade da caixa de contenção.

O volume de sedimentos produzidos em um determinado período é dado pela variação no volume da caixa de contenção:

$$V_{sed} = V_2 - V_1 \quad (7)$$

em que V_{sed} é o volume acumulado no período (m^3), V_2 é o volume medido no tempo 2 (m^3) e V_1 é o volume medido no tempo 1 (m^3). Desta forma, com o levantamento medindo toda a caixa de contenção, é considerado o acúmulo de sedimentos no fundo e também a ocorrência de solapamento das paredes.

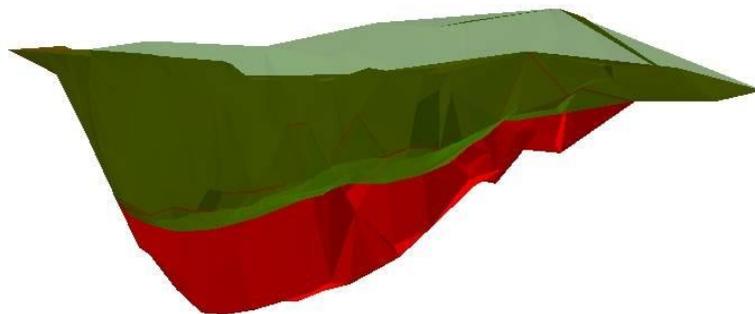


Figura 13 – Medições do volume de caixa de contenção em dois momentos distintos

A produção de sedimentos entre dois levantamentos consecutivos é então obtida com a equação

$$M_{sed} = V_{sed} \cdot D_{ss} \quad (8)$$

em que M_{sed} é a massa de sedimentos acumulada (t), V_{sed} é o volume acumulado (m^3) e D_{ss} é a densidade do depósito (t/m^3).

As medições dos volumes das caixas foram realizadas em três visitas de campo entre 26/03/2012 e 13/12/2013.

4.4.1. Previsão de produção acumulada de sedimentos

Para cada uma das parcelas monitoradas foram verificadas as relações entre a produção de sedimentos e fatores topográficos e climáticos foram definidos os parâmetros da Equação Universal de Perda de Solos (USLE) (WISCHMEIER e SMITH, 1978)

$$A = R.K.LS.C.P \quad (9)$$

em que A representa o total de sedimentos produzido ($t.ha^{-1}.ano^{-1}$), R é o fator de erosividade da chuva ($MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}$), K é o fator de erodibilidade do solo ($t.ha.h.ha^{-1}.MJ^{-1}.mm^{-1}$) LS é o fator topográfico adimensional, C é o fator adimensional de uso e manejo do solo e P é o fator adimensional de práticas conservacionistas.

Como não há nenhum tipo de cobertura do solo ou prática de controle de erosão dentro das parcelas os fatores C e P foram desconsiderados na aplicação da USLE para as parcelas de estrada.

O fator R de um determinado período de tempo é definido como:

$$R = \sum_{i=1}^j EI_{30} \quad (10)$$

O índice EI_{30} é definido pela razão entre a energia de um dado evento e a intensidade máxima observada em 30 min (WISCHMEIER, 1954). Para o cálculo deste índice assume-se que nem todos os eventos de precipitação são capazes de causar erosão. Desta forma os eventos erosivos foram separados seguindo o critério de Wischmeier e Smith (1978). Os eventos erosivos são aqueles com precipitação igual ou superior a 10mm, ou se apresenta precipitação de 6mm ou mais em 15 min. Dois eventos são considerados independentes quando são separados por um período de 6h com precipitação inferior a 1mm. Os eventos não erosivos, que não são utilizados para o cálculo do fator de erodibilidade da USLE, são aqueles com precipitação superior a 1mm em 6h.

A energia de cada evento é dada pelo somatório da energia para cada intensidade observada:

$$E = 0,119 + 0,0873 \log_{10}(I_p) \quad I \leq 76 \text{mm.h}^{-1} \quad (11)$$

$$E = 0,283 \quad I > 76 \text{mm.h}^{-1} \quad (12)$$

em que E é a energia ($\text{MJ.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$) e I_p é a intensidade da chuva (mm.h^{-1}).

A intensidade máxima em 30 min foi determinada a partir de dados pluviométricos com intervalo de 10min. Com os dados discretizados desta forma Yin *et al.* (2007) recomenda que I_{30} (mm.h^{-1}) seja calculado com a seguinte equação:

$$I_{30} = \frac{P_{30}}{0,5} \quad (13)$$

em que P_{30} é a precipitação máxima acumulada em 30 minutos (mm).

O fator topográfico tem a função de ponderar a proporção de erosão da parcela considerada em relação à parcela padrão que possui 22,13 m de rampa e 9% de declividade. O cálculo deste fator, de acordo com Wischmeier e Smith (1978), é feito pela seguinte equação:

$$LS = (l / 22,13)^m (65,41 \text{sen}^2 S + 4,56 \text{sen} S + 0,065) \quad (14)$$

em que l é o comprimento da rampa (m); m é um expoente que varia de acordo com a declividade (0,5 se declividade igual ou maior que 5%, 0,4 se varia entre 4,5 e 3,5 %, 0,3 para 1 a 3% e 0,2 quando menor que 1%) e θ declividade ($^\circ$).

A partir dos dados observados e utilizando a equação 9 evidenciando o fator K este foi calculado por:

$$K = \frac{A}{R. \times LS} \quad (15)$$

4.4.2. Avaliação do efeito da adequação do trecho

Conhecendo os parâmetros da USLE foi realizado o cálculo do comprimento de rampa em um cenário sem a adequação do trecho. Foi utilizado o procedimento proposto por Wischmeier e Smith (1978):

$$P_L = \frac{i^{m+1} - (i-1)^{m+1}}{N^{m+1}} \quad (16)$$

em que i é a sequência numérica do segmento; N é o número de segmentos em que a vertente foi dividida.

O fator LS é então determinado para cada segmento pela razão do LS da vertente por P_L . A utilização deste método assume que a vertente pode ser dividida em pequenos segmentos com declividade uniforme e que as variações na declividade dos segmentos não são suficientes para causar a deposição dos sedimentos.

4.5. PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS DE ESTRADAS EM EVENTOS

4.5.1. Monitoramento de eventos

Para o monitoramento do escoamento e produção de sedimentos de parcelas durante eventos de precipitação foi desenvolvido um equipamento que utiliza o sistema de cubas basculantes, similar ao utilizado em pluviômetros, associado a leitura de turbidez dentro das cubas. O equipamento foi denominado Medidor Automático de Água e Sedimentos em Parcelas Experimentais (MAASPE) (Figura 14).

O MAASPE foi construído com básculas de 7,1 L e um sensor de turbidez foi instalado dentro de uma das básculas. O sistema de imã e reed switch são utilizados para a contagem de basculadas e para o acionamento do sensor de turbidez, que realiza leituras somente após o início do movimento da cuba. Este equipamento foi instalado dentro da caixa de contenção que capta o escoamento da parcela 5 para monitorar o escoamento superficial e produção de sedimento (Figura 15). Considerando a área de parcela 5 e o volume da báscula o MAASPE tem resolução de 0,043 mm de escoamento. O monitoramento utilizando o MAASPE foi realizado de 31/01/2013 a 20/02/2013. Para o monitoramento da precipitação foi instalado, próximo ao MAASPE, um pluviômetro com resolução de 0,25 mm de precipitação e aquisição de dados a cada 1 min (Figura 15).

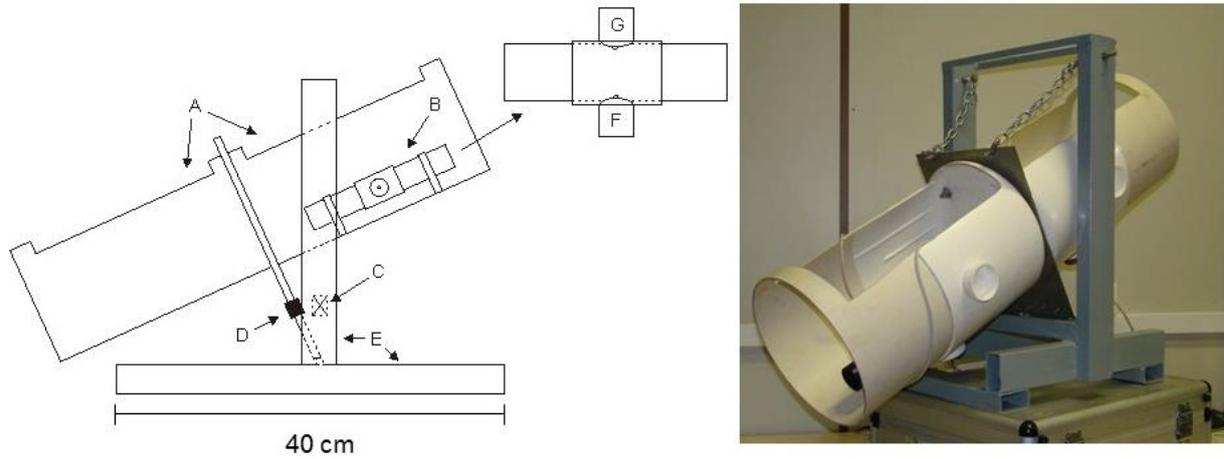


Figura 14 – Composição e vista geral do MAASPE; A - sistema de cubas basculantes; B - turbidímetro; C - reed switch; D - ímã; E - suporte metálico; G - fotosensor; F - fotoemissor.



Figura 15 – MAASPE instalado em caixas de contenção

4.5.1. Teste do turbidímetro

O turbidímetro desenvolvido foi comparado com um turbidímetro portátil *Hack 2100P* comparando o coeficiente de variação de três medições realizadas com cada sensor. Utilizando solo retirado da área de estudo foram preparadas 11 amostras com concentração de sedimentos variando entre 21 e 756 mg.L⁻¹.

A comparação do turbidímetro construído e instalado no MAASPE com o turbidímetro portátil demonstrou a robustez do sensor construído. Na comparação entre os coeficientes de variação de três repetições para cada concentração avaliada, apresentada na Figura 16, observou-se bons resultados com o sensor construído quando comparado ao turbidímetro de bancada (*Hack 2100P*), sendo que apenas para duas amostras (54 e 195 mg.L⁻¹) o sensor construído apresentou coeficiente de variação maior que o sensor comercial.

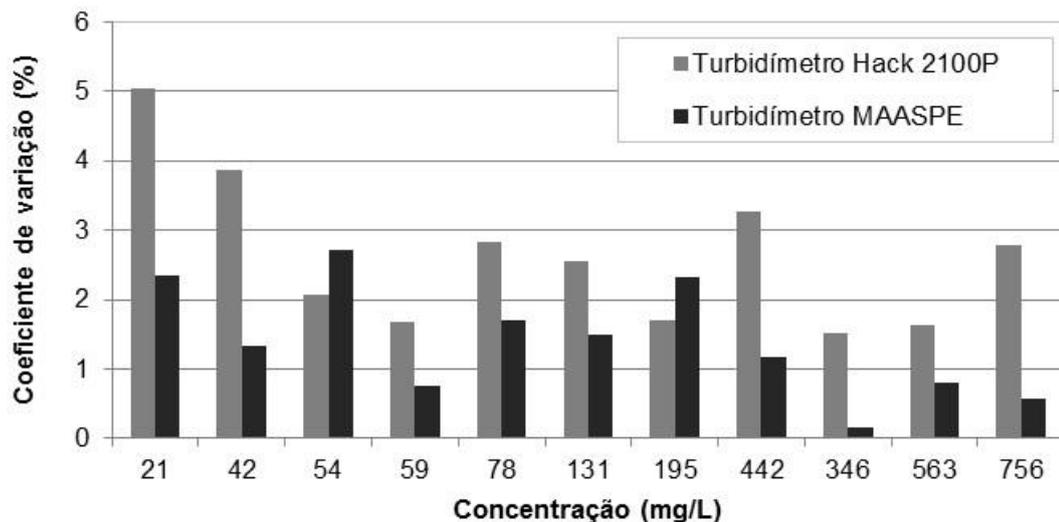


Figura 16 – Coeficiente de variação das medições de turbidez

A Figura 17 mostram a relação entre a turbidez (NTU) e resposta dos sensores construídos (Voltz). Nota-se que a relação não é uniforme para todos os valores medidos e possui dois ajustes, um linear para os valores baixos de turbidez e um potencial para os valores altos.

A curva de calibração do sensor é apresentada na Figura 18. O ajuste de equação potencial foi utilizado e apresentou R² de 0,97, utilizado para converter a resposta do sensor (V) em concentração de sedimentos (mg.L⁻¹).

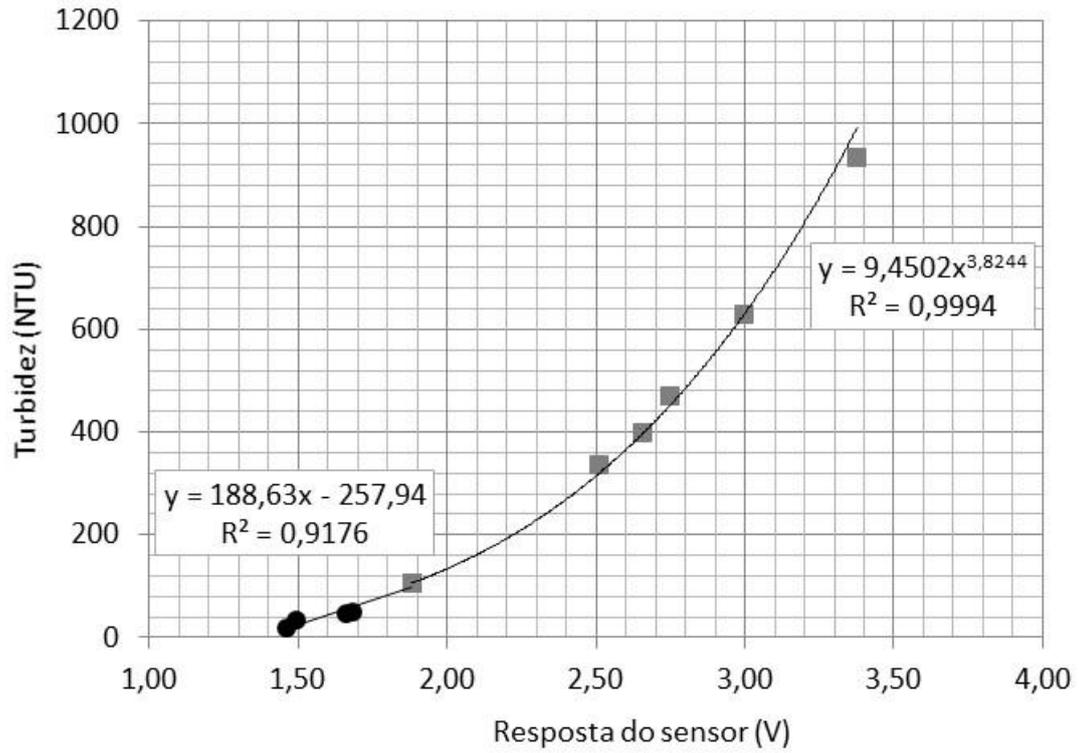


Figura 17 – Relação entre turbidímetro de bancada e turbidímetro MAASPE

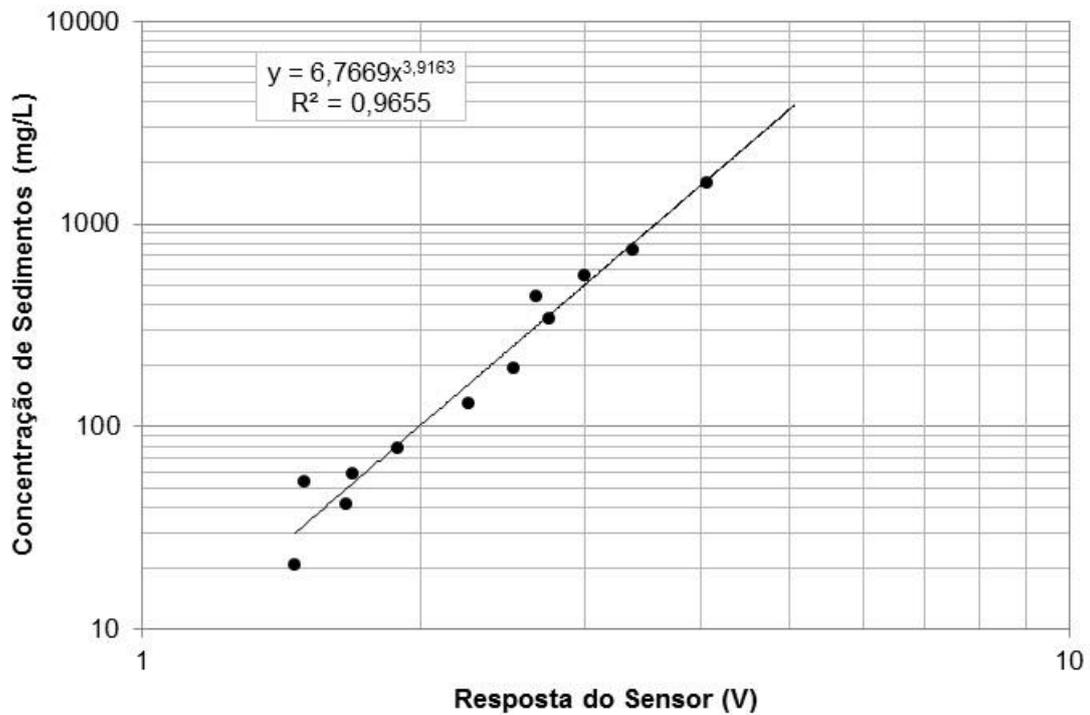


Figura 18 – Curva de calibração do sensor de turbidez MAASPE

4.5.2. Modelagem da produção de sedimentos de parcelas em eventos

A determinação das porções das parcelas com maior contribuição de sedimentos foi realizada por meio de simulações com o modelo LISEM (Limburg Soil Erosion Model) (DE ROO *et al.*, 1996). O LISEM é um modelo fisicamente baseado e foi concebido para realizar a simulação de escoamento superficial e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas durante evento de precipitação. As relações estabelecidas entre os processos simulados no modelo LISEM são apresentados na Figura 19.

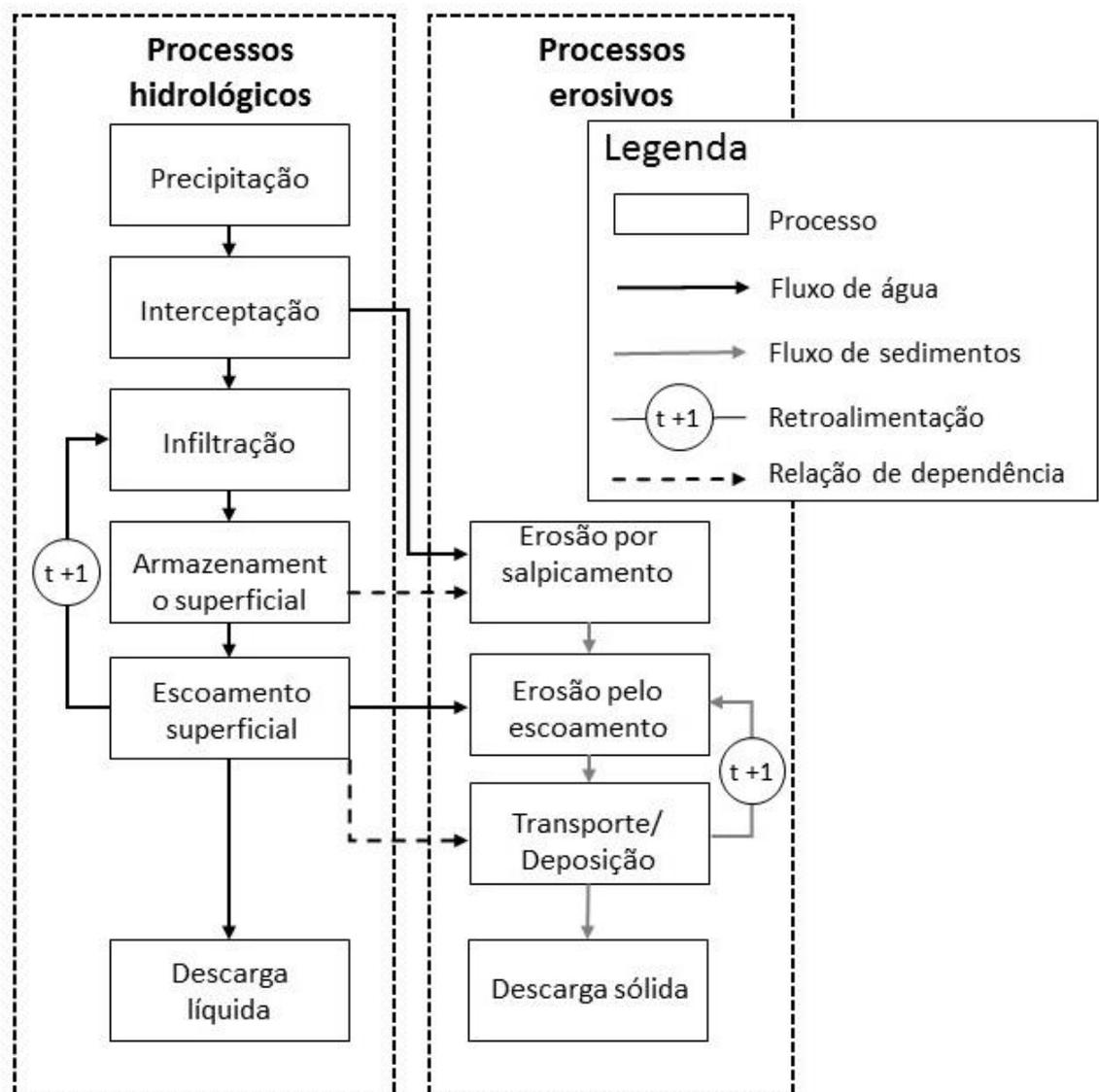


Figura 19 – Fluxograma de simulação do modelo LISEM. Modificado de De Roo e Jetten (1999)

Os processos considerados pelo modelo 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).

Neste trabalho o modelo LISEM foi aplicado em uma parcela de estrada. Sendo assim, os processos dependentes da interceptação não foram considerados e não serão descritos. A descrição do modelo foi feita de acordo com Jetten (2002).

O modelo LISEM 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. Neste trabalho foi o utilizado o modelo de Green e Ampt:

$$i = Ks \left(t + \frac{\Psi_m}{I} \right) \quad (17)$$

em que i é a taxa de infiltração ($m \cdot s^{-1}$); I é a infiltração acumulada (m); Ks é a condutividade hidráulica saturada; t é o tempo (s); Ψ_m é a tensão matricial (m).

O cálculo do armazenamento máximo em micro depressões é dado por pela relação entre a rugosidade da superfície (RR), definida como o desvio padrão das alturas da superfície, e a declividade e é calculado pela equação:

$$MDS = 0,243 \cdot RR + 0,01 \cdot RR^2 + 0,012 \cdot RR \cdot S \quad (18)$$

em que S é a declividade (%).

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

$$Q = \frac{A_{sec}}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (19)$$

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

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:

$$e = Ds + Df - Dp \quad (20)$$

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

A desagregação por salpicamento é calculada em função da estabilidade de agregados, energia cinética da chuva e altura do escoamento na superfície:

$$Ds = \left(\frac{2,28}{As \cdot Ke \cdot \exp(-1,48h_w) + 2,96} \right) \cdot P \cdot A \quad (21)$$

em que: As é a estabilidade de agregados (número de gotas de chuva necessárias reduzir o agregado em 50%); Ke é a energia cinética ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$); 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 é dada por:

$$D = Y(Tc - C) \cdot Vs \cdot w \cdot dx \quad (22)$$

em que D é Df ou Dp ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$); Tc é a capacidade de transporte ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); C é a concentração de sedimentos ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); Vs é a velocidade de queda das partículas ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); w é a largura do escoamento (m); dx é a largura 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 and Govers, 1988):

$$Y = \frac{u \min}{uc} = \frac{1}{(0,89 + 0,56 \cdot coh)} \quad (23)$$

em que uc é a velocidade crítica de cisalhamento ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$); $umin$ é o valor mínimo para a velocidade de cisalhamento crítica ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$); Coh é a coesão do solo úmido (kPa).

A capacidade de transporte do escoamento é calculada pela seguinte equação (Govers, 1990):

$$Tc = 2650 \cdot c \cdot (V \cdot S \cdot 10 - 0,4)^d \quad (24)$$

em que V é a velocidade do escoamento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Os parâmetros c e d dependem da granulometria dos sedimentos e seu cálculo é baseado no trabalho de Gover (1990):

$$c = \left[\frac{(D_{50} + 5)}{0,32} \right]^{-0,6} \quad (25)$$

$$d = \left[\frac{(D_{50} + 5)}{300} \right]^{0,25} \quad (26)$$

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

4.5.2.1. Dados para a simulação

Os dados de entrada do modelo LISEM são informados de forma distribuída no espaço. Ou seja, todos os parâmetros de entrada são indicados utilizando arquivos em formato *raster*. No presente trabalho, com exceção dos topográficos, todos os parâmetros foram assumidos como homogêneos para toda a extensão da parcela.

Os dados de condutividade hidráulica saturada, D_{50} e porosidade total foram obtidos com os ensaios anteriormente descritos. O potencial matricial na frente de molhamento (Ψ_m), utilizado para o modelo de infiltração de Green e Ampt, foi calculado utilizando a equação de Raws *et al.* (1983):

$$\begin{aligned} \Psi_m = \text{Exp} & (6,5309 - 7,3256 \cdot \alpha + 0,0011583 \cdot \text{Arg}^2 + 3,809479 \cdot \alpha^2 \\ & + 0,0003444 \cdot \text{Are} \cdot \text{Arg} - 0,049837 \cdot \text{Are} \cdot \alpha + 0,001608 \\ & \cdot \text{Are}^2 \cdot \alpha^2 + 0,001602 \cdot \text{Arg}^2 \cdot \alpha^2 - 0,000014 \cdot \text{Are}^2 \\ & \cdot \text{Arg} - 0,00348 \cdot \text{Arg}^2 \cdot \alpha - 0,0008 \cdot \text{Are}^2 \cdot \alpha) \end{aligned} \quad (27)$$

em que α é a porosidade total ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$); Arg é o percentual da fração argila (%); Are é percentual da fração areia (%). Os demais parâmetros foram obtidos na literatura (Tabela 4).

Tabela 4 – Valores de parâmetros obtidos na literatura

Parâmetro	Valor	Fonte
<i>RR</i>	0,01	Takken <i>et al.</i> (1999)
<i>n</i>	0,01	Takken <i>et al.</i> (1999)
<i>Coh</i>	12	Horn e Fleige (2003)
<i>Aggregates</i>	200	Kværnø e Stolte (2012), Takken <i>et al.</i> (1999)

4.5.2.2. Calibração e validação

A calibração do modelo foi realizada para um evento e o mesmo conjunto de parâmetros foi aplicado para os demais, variando apenas a umidade inicial. Desta forma é possível verificar a adequação do conjunto de parâmetros e avaliar a representatividade física das simulações

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

$$COE = 1 - \frac{\sum (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (28)$$

em que Q_{sim} é a vazão simulada, Q_{obs} é a vazão observada, e $\overline{Q_{obs}}$ é a média das vazões observadas. O COE pode variar de $-\infty$ a 1, sendo $COE = 1$ indicativo de ajuste perfeito.

As simulações foram também avaliadas quanto a capacidade de simular o escoamento total do evento, escoamento de pico, infiltração e produção total de sedimentos avaliando o coeficiente de determinação (R^2).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA DAS PARCELAS

O levantamento topográfico realizado no trecho estudado possibilitou o conhecimento detalhado das características morfológicas de cada parcela. Para a determinação das dimensões e características de cada uma das sete parcelas foi determinada a declividade e comprimento do leito, altura e declividade dos barrancos de corte bem como o volume de cada caixa de contenção (Tabela 5).

Tabela 5 – Resumo das características morfológicas de cada parcela estudada

Parcela	Altura do barranco (m)		Declividade do barranco (%)		Área de leito (ha)	Volume da caixa (m ³)	Comprimento do leito (m)	Declividade do leito (%)
	E ¹	D ²	E	D				
1	0,3	0,38	39,0	47,5	0,0133	6,7	34,9	9
2	0,9	0,9	52,9	52,9	0,0159	7,18	40,3	9,4
3	1,5	1,6	75,0	43,2	0,0169	4,44	43,5	6,2
4	- ³	-	-	-	0,0148	6,27	38,8	3,8
5	-	-	-	-	0,0167	11,96	41,5	3
6	0,6	0,8	31,6	30,8	0,0134	10,21	37,7	4,7
7	1,2	0,8	48,0	29,6	0,0139	11,43	38,3	2,4

¹ Barranco do lado esquerdo

² Barranco do lado direito

³ Não foi identificado barranco na parcela

5.2. ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DAS PARCELAS

5.2.1. Granulometria

A análise granulométrica foi realizada para caracterizar as parcelas e o sedimento acumulado nas caixas de contenção, possibilitando identificar a ocorrência de separação de algumas frações de diâmetros devido à capacidade de transporte do escoamento superficial. As curvas de frequência acumulada por diâmetro de partículas são apresentadas na Figura 20. A textura da parcela 1 é classificada como franco-arenosa enquanto as demais são franco-siltosas.

As frações argila e areia sofreram maior variação entre a disponibilização nas parcelas e o transporte até as caixas não havendo tendência clara de aumento ou diminuição (Figura 21). A maior variação ocorreu na fração de argila da caixa 1 que apresentou aumento de 211%. Tendo em vista os resultados encontrados nas outras caixas acredita-se que esta variação possa estar relacionada à amostragem dos sedimentos. Como os sedimentos são depositados nas caixas por decantação das partículas em suspensão ocorre a formação de uma estratificação por tamanho destas partículas. Sendo assim as amostras utilizadas na determinação da granulometria podem não ser representativas.

A menor variação observada ocorreu na fração silte. Esta classe granulométrica é a que compõe a maior parte da fração mineral das parcelas, entre 47 e 78 %, sendo também representativa nos sedimentos transportados. Desta forma confirma-se a menor resistência ao transporte imposto pelas partículas de silte.

Comparando a distribuição granulométrica dos sedimentos em parcelas de estrada e os transportados, em área com predomínio de material com diâmetro superior a 2 mm, Ramos-Scharrón (2010), observou que o conteúdo de argila e silte manteve-se aproximadamente constante, enquanto ocorre enriquecimento de areia e diminuição drástica das partículas de cascalho. Desta forma pode-se atribuir a diminuição da proporção de sedimentos de maior diâmetro devido à incapacidade do escoamento de transportar partículas de maior massa.

Estes resultados se aproximam das conclusões de Croke *et al.* (2005) que afirmam que os sedimentos provenientes das estradas possuem predominantemente diâmetro inferior a 2 mm. Como os sedimentos disponíveis nas parcelas do presente estudo são de diâmetro inferior a 2 mm e não ocorreu uma tendência de seleção de determinada classe granulométrica conclui-se que o escoamento que ocorre nas parcelas é capaz de transportar os sedimentos disponíveis independentemente de seu diâmetro não havendo seleção granulométrica do material.

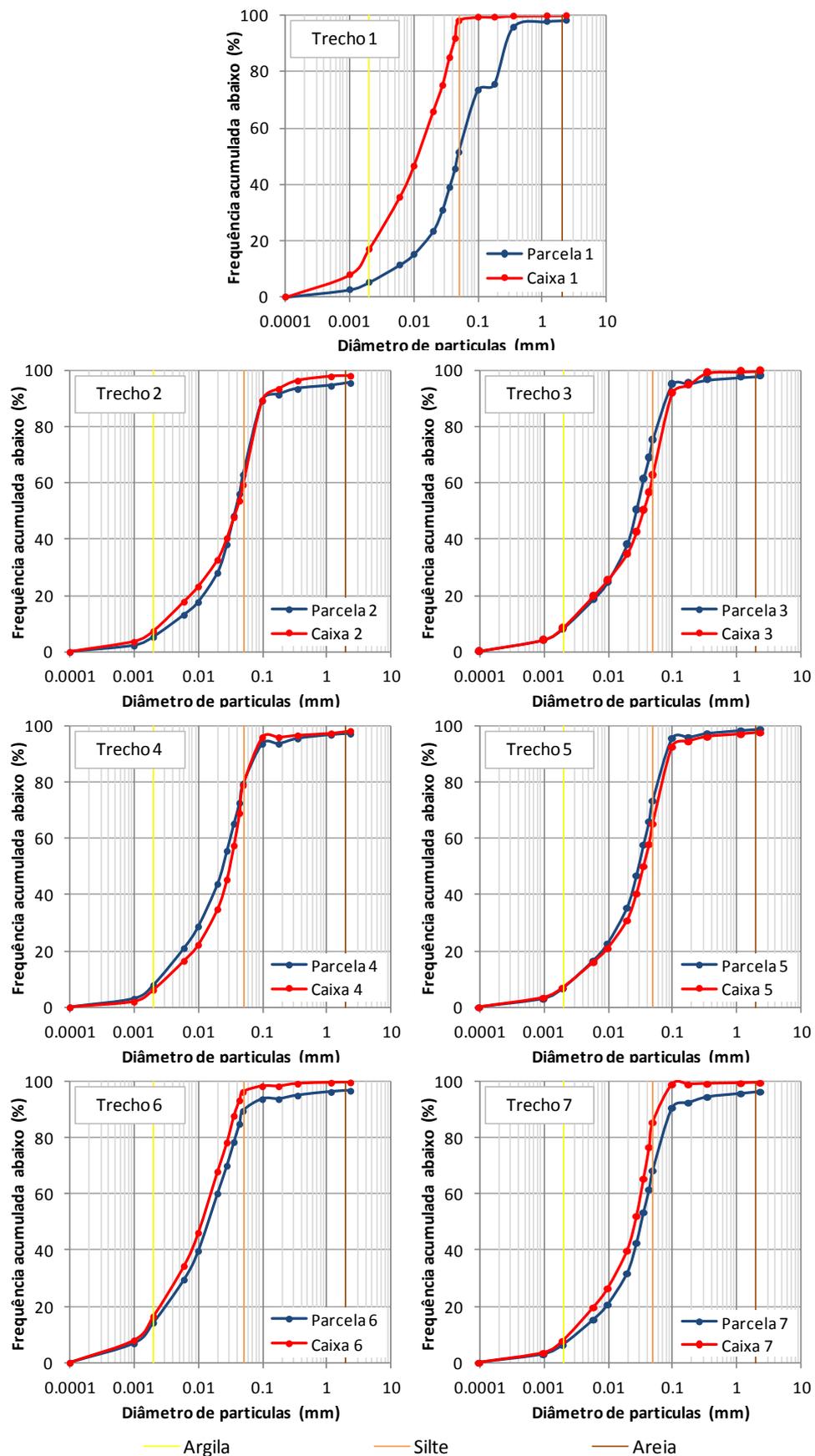


Figura 20 - Curvas granulométricas de amostras coletadas nos trechos e nas caixas de contenção e limite superior das classes granulométricas de argila, silte e areia.

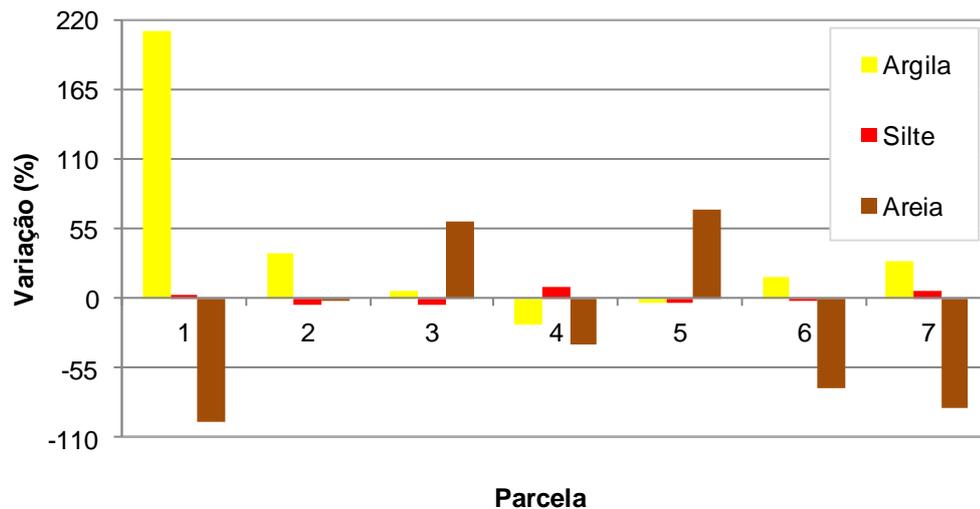


Figura 21 – Variação na massa de sedimentos transportados das parcelas para as caixas de contenção

5.2.2. Infiltração

Foram realizados ensaios de infiltração para obter os parâmetros de velocidade de infiltração básica (VIB) para as parcelas 1 e 5 bem como de uma área externa à parcela 5. Este parâmetro é equivalente à condutividade hidráulica saturada (k_s). Desta forma foram obtidos os parâmetros de infiltração possibilitando uma comparação entre as características de infiltração da estrada e de áreas de reflorestamento.

Os dados obtidos com o ensaio de infiltração utilizando anéis concêntricos foram utilizados para ajustar os modelos de infiltração de Kostiakov e Horton. Os resultados, avaliados utilizando o coeficiente de determinação (R^2), apresentaram melhor ajuste com o modelo de Horton para sete ensaios, todos com R^2 maiores que 0,9 e superiores aos observados para o modelo de Kostiakov, sendo que para um dos ensaios em área de reflorestamento o modelo de Kostiakov apresentou melhores resultados (Tabela 6).

Separando os resultados estimados pelos modelos de infiltração para os ensaios no leito da estrada e área externa são evidenciadas diferenças de ajuste dos modelos para as duas condições de uso. A variação da taxa de infiltração durante o ensaio pode ser descrita em três fases, sendo a inicial em que ocorre a maior taxa, a intermediária quando ocorre decréscimo da taxa e a final que corresponde à estabilização.

Tabela 6 – Ajuste dos modelos de infiltração

Ensaio	Kostiakov	Horton		Ks ensaio de poço (mm/h)
	R ²	R ²	VIB (mm/h)	
Parcela 1	0,802	0,993	20,05	5,4
	0,815	0,991	19,67	
	0,543	0,962	9,82	
Parcela 5	0,853	0,998	6,36	15,2
	0,684	0,999	20,99	
	0,861	0,994	4,54	
A. Externa	0,971	0,893	65,82	-
	0,924	0,971	48,00	

Nos ensaios realizados nas parcelas o decréscimo da taxa de infiltração ocorre rapidamente atingindo o valor constante que permanece até o final do ensaio, enquanto na área externa a fase de decréscimo é mais longa (Figura 22). Esta característica foi representada de forma diferente pelos dois modelos. Para as parcelas de estrada o modelo de Horton reproduziu bem o comportamento da taxa de infiltração observada inclusive o rápido decréscimo (Figura 23a). O modelo de Kostiakov, por outro lado, subestimou a taxa inicial e superestimou os valores durante o decréscimo. Comparando os dados dos ensaios realizados na área externa com os modelos percebe-se que as taxas iniciais são bem representadas por ambos os modelos (Figura 23b). No entanto para as taxas de infiltração menores que 100 mm/h, correspondentes ao decréscimo, foram subestimados pelo modelo de Horton. O ajuste dos modelos para a fase final do ensaio, com taxa constante, foi adequado nos dois modelos.

Considerando o melhor desempenho do modelo de Horton este foi utilizado para a determinação da VIB de cada teste. A fim de confirmar os valores da condutividade hidráulica obtidos com o teste de infiltração, proporcional ao valor da infiltração final, foi realizado em campo nas duas parcelas o ensaio de poço invertido (Tabela 6). No entanto, os valores obtidos pelo teste de poço não mostraram coerência com os valores de infiltração. Isso se deu pela forma com que o teste é realizado, perfurando o leito da estrada e descaracterizando a superfície e consequentemente impactando nos valores de condutividade hidráulica medidos. Para permitir comparação dos resultados a Tabela 7 apresenta uma classificação da condutividade hidráulica saturada.

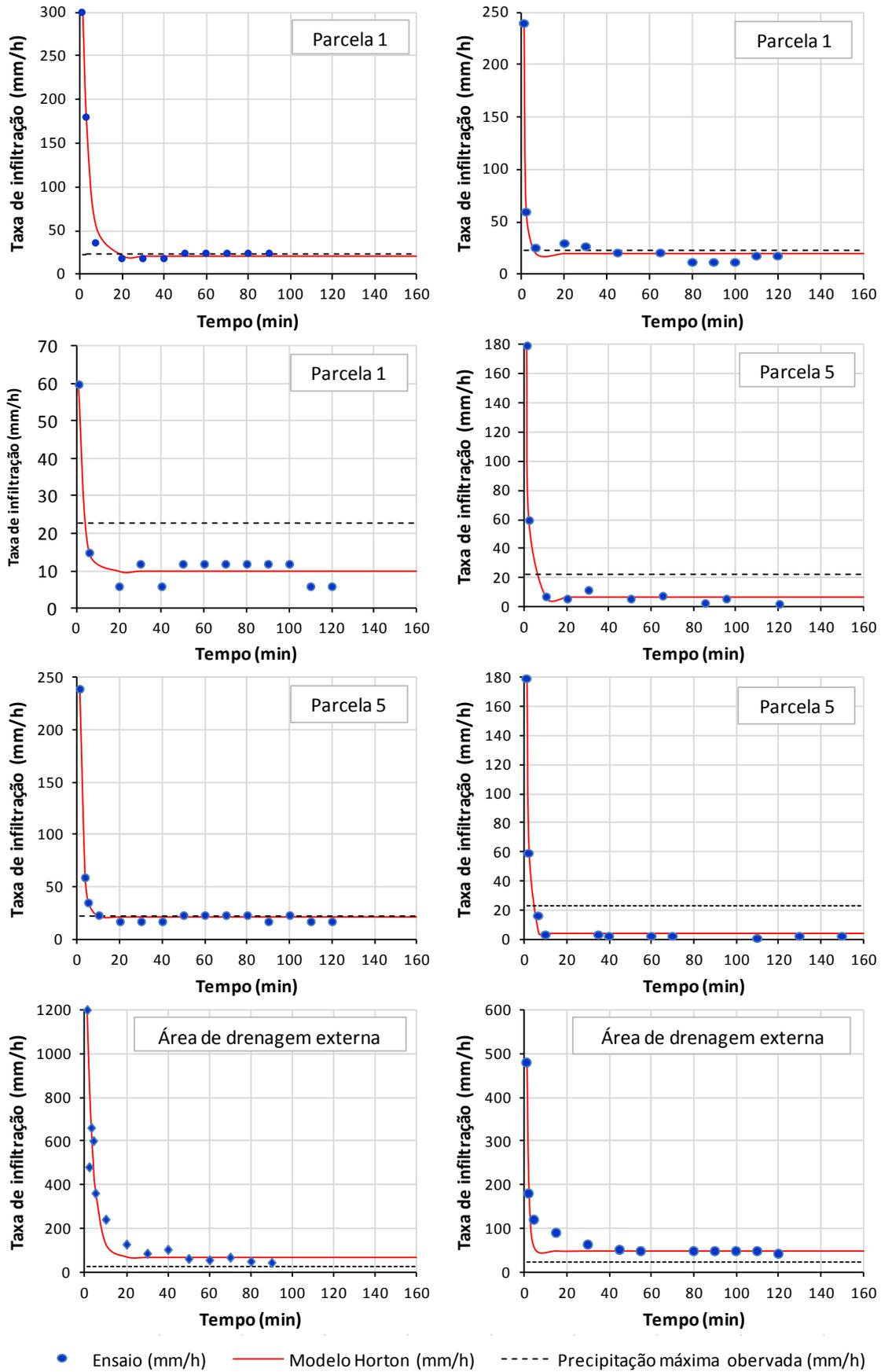


Figura 22 – Ensaios de infiltração comparando o ajuste da equação de Horton com a precipitação máxima observada no período de estudo

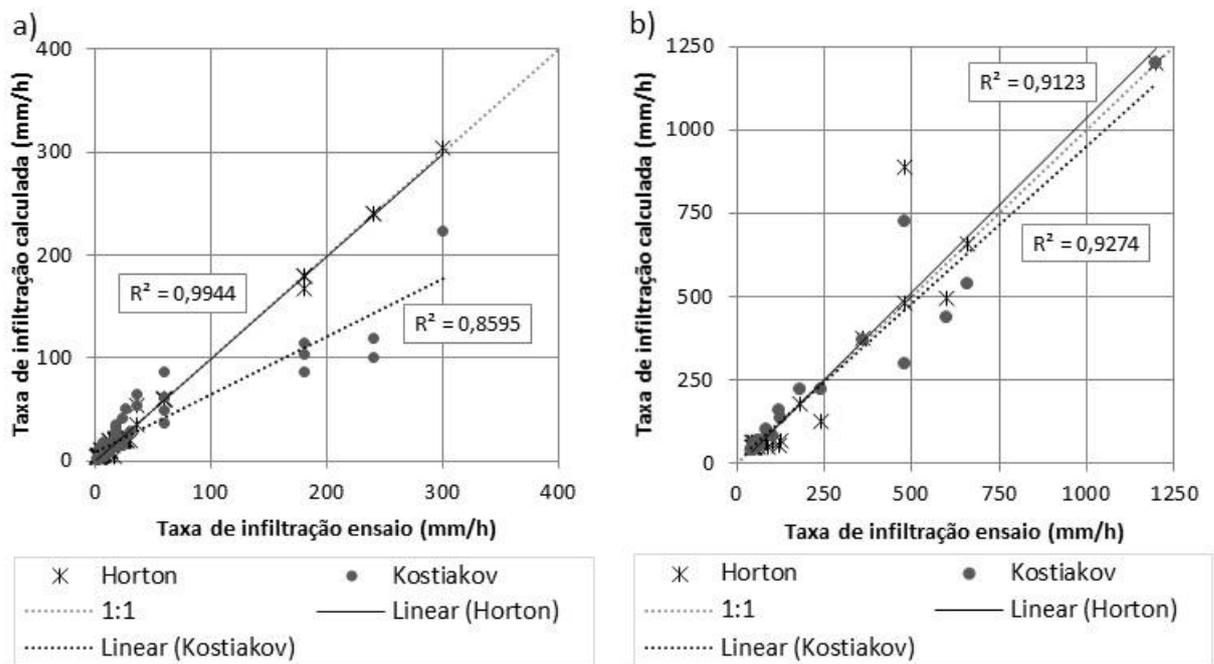


Figura 23 – Comparação entre ajuste dos modelos de Kostiakov e Horton e dados ensaiados. a) Dados simulados e observados de infiltração em duas parcelas de estrada. b) Dados simulados e observados de infiltração em área de drenagem externa.

A taxa de infiltração final dos ensaios realizados nas parcelas não foi muito lenta como os relatados por Elliot (1999) e Luce e Cundy (1994) que encontraram valores inferiores a 1 mm/h. No entanto, estão dentro da faixa de valores de condutividade hidráulica saturada apresentada por Foltz *et al.* (2009), que podem variar entre 0,2 a 21 mm/h em estradas. Os valores de VIB para área externa estão coerentes de acordo com os resultados de Santos (2009) que em estudo realizado em bacia experimental próxima a área do presente estudo encontrou valores de infiltração final entre 20 e 390 mm/h.

Tabela 7 – Classes de condutividade hidráulica saturada

Classe	Condutividade hidráulica saturada (mm/h)	Exemplo de textura
Muito lenta	< 1	Argila densa
Lenta	1 a 5	Argila
Moderadamente lenta	5 a 20	Argila siltosa
Moderada	20 a 60	Silte
Moderadamente rápida	60 a 130	Areia fina
Rápida	130 a 250	Areia média
Muito rápida	>250	Areia grossa

Fonte: Modificado de Cauduro e Dorfman (1986) e Oosterbaan e Nijland (1994)

Org. Santos (2009)

A Figura 22 apresenta a comparação entre a intensidade máxima de precipitação observada em uma hora durante o período monitorado (22,6 mm/h) e a capacidade de infiltração final. Esta análise permite determinar a ocorrência de escoamento superficial hortoniano que ocorre quando a taxa de precipitação é superior a taxa de infiltração. Sendo assim, considera-se como pior cenário possível, ou seja, o mais favorável à ocorrência de escoamento superficial, aquele em que o solo está previamente saturado e ocorre a chuva de maior intensidade observada. De acordo com os dados apresentados na Figura 22 a precipitação de maior intensidade observada não superou a VIB nas áreas externas às parcelas. Em contraste a mesma análise para as parcelas mostra que a precipitação supera a VIB em todos os ensaios realizados.

Isto significa que somente nas estradas ocorreu escoamento hortoniano durante o período estudado. Desta forma as análises desenvolvidas no restante deste trabalho consideraram a área de drenagem efetiva de cada parcela como sendo a área ocupada pelo leito da estrada.

Os valores de K_s determinados para as áreas externas apresentam coerência com os exemplos de valores médios esperados pela textura do solo. Como há predomínio de silte nos solos da área de estudo espera-se que K_s apresente valores entre 20 e 60 mm/h (Tabela 7). O K_s obtido com a equação de Horton para a área externa foi de 48,0 e 65,8 mm/h, confirmando os valores esperados. Já dentro das parcelas os resultados variaram entre 4,5 e 21,0 mm/h, indicando a influência de outras características do solo influenciando o processo de infiltração.

5.2.3. Densidade e porosidade

Foram realizadas análises de densidade e de porosidade do solo de quatro locais sendo duas parcelas e as áreas externas adjacentes (Tabela 8). Nas parcelas 1 e 5 a densidade é, respectivamente, 15 e 36 % maior comparada às áreas externas. Para a porosidade a relação é inversa sendo que nas parcelas é 5 e 27 % menor.

Esta diferença entre a porosidade encontrada nas áreas externas e nas estradas explica as taxas de infiltração reduzida nas estradas. O leito passa por processo de compactação durante a construção e manutenção estrada que causam

o aumento da densidade e diminuição do espaço poroso do solo e conseqüentemente diminui a capacidade de infiltração.

Tabela 8 – Densidade e porosidade do solo no leito da estrada e em área externa

Local	Densidade (g/cm ³)	Porosidade Total (%)	VIB média (mm/h)
Parcela 1	1,20	52,5	16,5
A. Externa 1	1,05	55,0	-
Parcela 5	1,59	37,0	10,6
A. Externa 5	1,17	51,00	56,9

5.1. PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM LONGO PERÍODO

Utilizando o levantamento topográfico das caixas de contenção e com os resultados de densidade do material depositado, apresentados na Tabela 9, foi possível determinar a produção de sedimentos de cada parcela. Foram realizadas três medições com intervalo irregular. Desta forma a produção de sedimentos dos períodos são relativas à 129 (26/03/2012 a 01/08/2012), 70 (01/08/2012 a 10/10/2012) e 64 (10/10/2012 a 13/12/2012) dias. Na caixa de contenção da parcela 5 não foi possível realizar o levantamento do acúmulo de sedimentos devido à presença de lamina de água observado em todas as visitas de campo.

Tabela 9 – Acúmulo de sedimentos e densidade do depósito

Parcela	Volume de sedimentos (m ³)			Densidade t/m ³	Produção total (t/ha)
	1	2	3		
1	0,97	0,71	2,72	1,19	396
2	1,96	0,83	2,20	1,23	385
3	1,61	0,71	1,37	1,16	253
4	1,20	0,09	1,23	1,30	222
6	0,87	0,63	1,28	1,25	259
7	1,08	0,33	0,64	1,11	163

A produção do período medido (26/03/2012 a 13/12/2012) variou entre 163 e 396 t/ha, produção média de 280 t/ha. Os valores de produção de sedimentos estão de acordo com o observado na literatura. Em trabalho realizado por Ramos-Scharrón e MacDonald (2007), considerando estradas não pavimentadas que passaram por manutenção foi observada produção de sedimentos de 5,7 a 580 t/ha em estradas

com declividade de 2 e 21% respectivamente. A produção de sedimentos apresentou diminuição entre os períodos 1 e 2 sucedido de aumento no período 3 sendo que neste último houve maior diferença entre as parcelas (Figura 24).

A variação da produção de sedimentos em função do tempo é dependente das características da precipitação que pode apresentar grande variabilidade interanual diferindo no volume, intensidade e erodibilidade (Tabela 10). Outro fator importante no caso das estradas é a intervenção realizada na manutenção dos trechos. Durante o nivelamento e manutenção de dispositivos de drenagem das estradas a movimentação do solo que causa desestruturação e gera pequenos depósitos de sedimentos facilmente transportados.

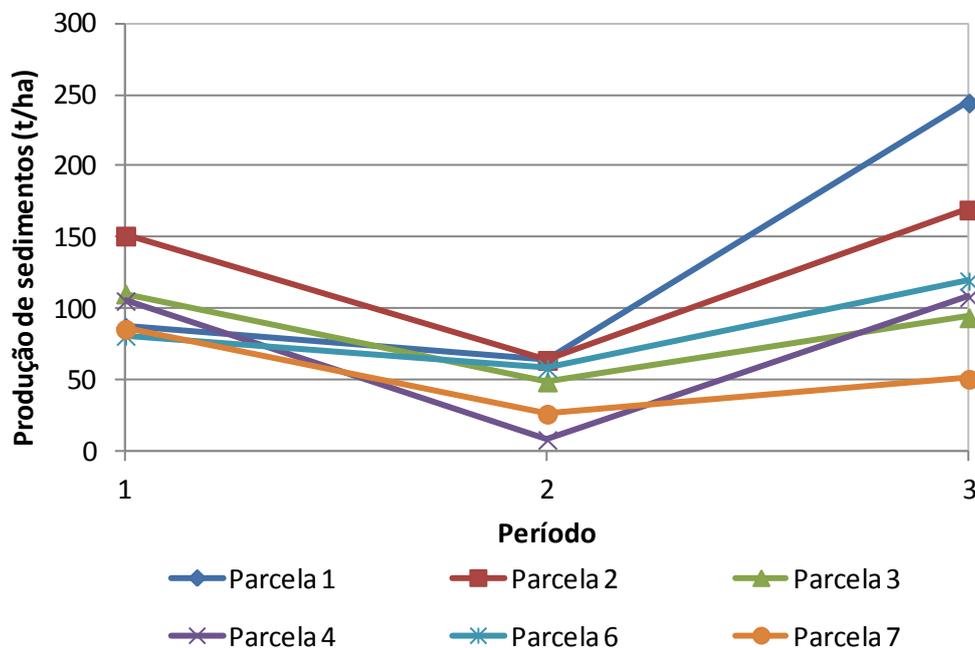


Figura 24 – Produção de sedimentos acumulada em cada período

5.2. DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS USLE E SUAS RELAÇÕES COM A PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

Os parâmetros da USLE foram definidos para cada um dos três períodos em que as medições de sedimentos foram realizadas bem como para a soma dos mesmos. O fator R , que representa a erosividade da chuva, foi determinado pela soma do índice EI_{30} de cada período (Tabela 10). Dos 124 eventos de precipitação ocorridos apenas 29 foram erosivos e, portanto somente estes contribuíram para o EI_{30} .

A soma do índice dos três períodos considerados totaliza 4236 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹ em 263 dias. Este valor é inferior às médias históricas encontradas por Waltrick (2010) para as estações de Rio Negro e Mandirituba, no estado do Paraná, que apresentaram 6810 e 5670 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.ano⁻¹. No entanto, o valor calculado neste trabalho pode ser considerado adequado, tendo em vista que o período foi inferior a um ano, e os dados das estações próximas foram elaborados a partir das médias anuais.

Os períodos são caracterizados por diferenças consideráveis na ocorrência de precipitação e valores totais do índice EI_{30} . O valor de erosividade dividido pela precipitação mostra que no período 3 as chuvas geraram maior potencial erosivo se comparado ao período 1 que apresentou maior erosividade.

Tabela 10 – Resumo da precipitação e índice EI_{30} dos períodos considerados

Período	Limites	nº dias	PCP Total (mm)	EI_{30} (MJ.mm.ha ⁻¹ .h ⁻¹)							EI_{30} Total	Erosividade por mm de chuva
				nº de eventos								
				0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600		
1	26/03/2012 a 01/08/2012	129	781	9	3	1	0	2	1	2419	3,1	
2	01/08/2012 a 10/10/2012	70	114	5	0	1	0	0	0	316	2,8	
3	10/10/2012 a 13/12/2012	64	307	2	2	1	1	1	0	1501	4,9	

¹ Os valores apresentados correspondem a soma das médias mensais correspondentes a cada período

O índice EI_{30} indica a capacidade de causar erosão e, portanto deve apresentar correlação positiva com a produção de sedimentos (WISCHMEIER, 1954). Avaliando esta relação entre a erosividade e a produção de sedimentos para os três períodos a relação positiva foi observada em todas as parcelas (Figura 25 g). No entanto, nas parcelas 1 e 6 (Figura 25 A e E) apesar de haver uma tendência de aumento da produção de sedimentos relacionada ao índice EI_{30} observa-se grande dispersão dos dados em relação ao ajuste linear apresentando coeficientes de determinação (R^2) inferiores a 0,2. Ou seja, a erosividade da chuva não explica totalmente a produção de sedimentos, havendo a influência de outros fatores climáticos e físicos que podem influenciar o processo de remoção e transporte de sedimentos.

O fator LS tem como função incluir o efeito da topografia da parcela na previsão da erosão. Então, parcelas com o mesmo tipo de solo e cobertura submetidos a uma mesma chuva, devem teoricamente apresentar forte correlação positiva com o fator

LS. Sendo assim, a alta dependência entre a produção de sedimentos e o fator *LS* em diferentes parcelas indica homogeneidade em relação aos outros fatores que condicionam o processo de desagregação e transporte de sedimentos.

A Figura 26 apresenta a relação entre o fator *LS* e a produção de sedimentos em cada um dos períodos considerados. A relação entre as duas variáveis apresenta melhora gradativa com o tempo, fato evidenciado pelo aumento do R^2 . Esta evolução pode ser um indicativo da diminuição da influência da intervenção causada pelo processo de adequação da estrada que pode causar a disponibilização de sedimentos de forma diferenciada em cada parcela. Sendo assim ocorre uma tendência de homogeneização das características do solo e aumento do controle topográfico.

O fator *K* é a resistência que o solo apresenta frente à ação erosiva da chuva e escoamento. Então o *K* calculado representa o valor necessário para produzir uma quantidade de sedimento considerando as características topográficas e a erodibilidade da chuva que ocorreu em um determinado período. Os valores calculados do fator *K* para o período variaram entre 0,06 e 0,15 t h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹, com média de 0,096.

Considerando a erosividade de cada período o fator *K* apresentou variação em função das do EI_{30} (Figura 27). Destaca-se que no período 2 ocorreu o maior valor de *K*. O valor elevado se deve a uma produção de sedimentos proporcionalmente grande em relação ao EI_{30} calculado para o período. Esta relação evidencia que a erosividade das chuvas de um período não foi capaz de explicar totalmente o processo.

A distribuição dos eventos erosivos no tempo mostra que podem ocorrer longos períodos sem precipitação nos quais conseqüentemente não ocorrem eventos capazes de causar erosão (Figura 28). Para representar esta condição foi elaborado um índice chamado tempo máximo relativo entre eventos erosivos (TMr). Este índice corresponde à razão entre o tempo máximo entre eventos erosivos observado em um período e o tempo total do período.

O índice TMr possui relação direta com o fator *K* (Figura 29) e estão fortemente relacionados ($R^2=0,92$), ou seja, o tempo sem chuva modifica as propriedades do solo aumentando a erodibilidade. Sendo assim a produção de sedimentos não está apenas relacionada à ocorrência dos eventos erosivos uma vez que as condições antecedentes condicionam a intensidade do processo erosivo. Forsyth *et al.* (2006) relatou o aumento do escoamento superficial, e conseqüente erosão, em decorrência de evento de precipitação que ocorreu após período seco.

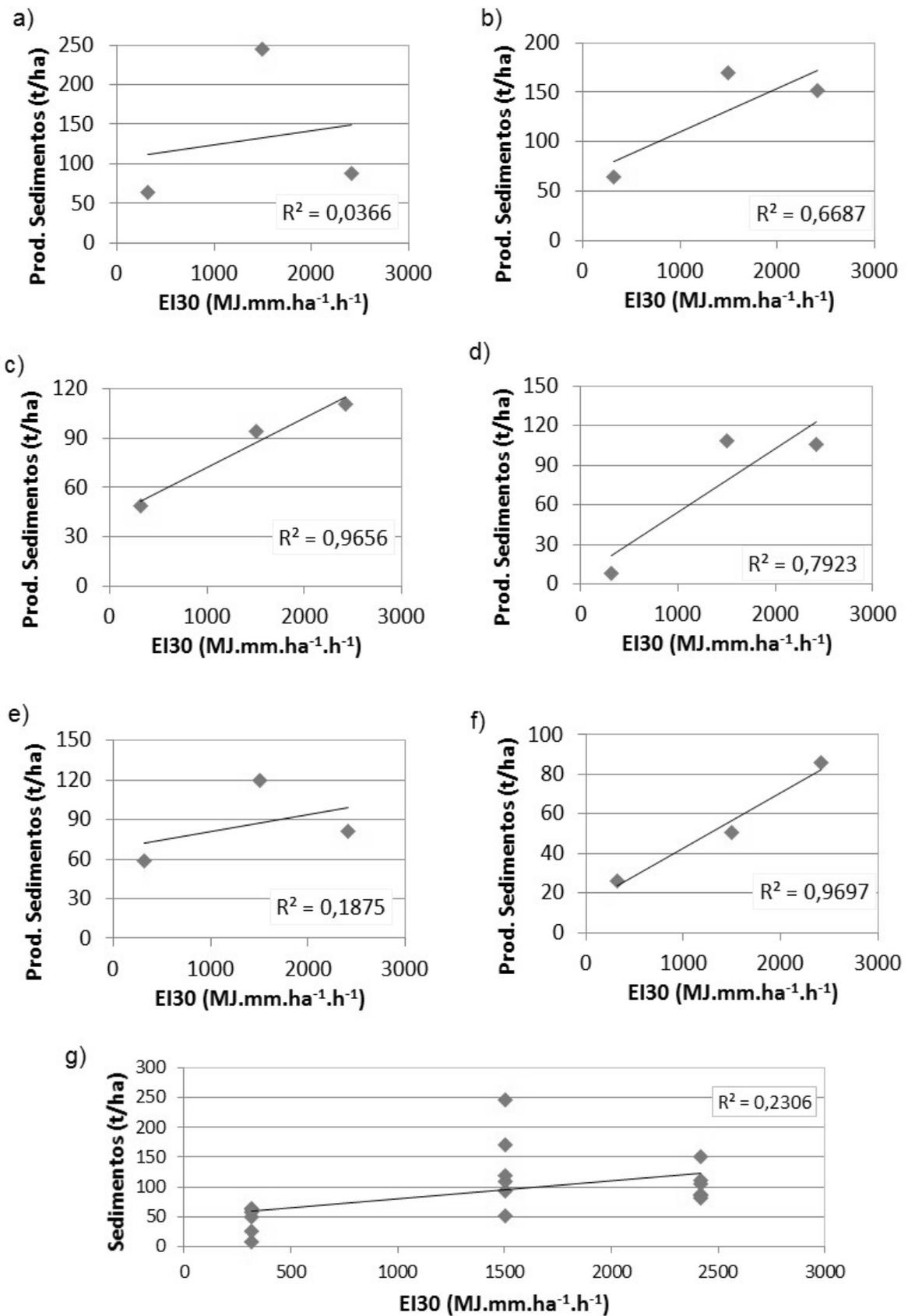


Figura 25 – Relação entre EI₃₀ e Produção de sedimentos. a) Parcela 1; b) Parcela 1; c) Parcela 1; d) Parcela 1; e) Parcela 1; f) Parcela 1; g) Relação de todos os dados de produção de sedimentos e o índice EI₃₀.

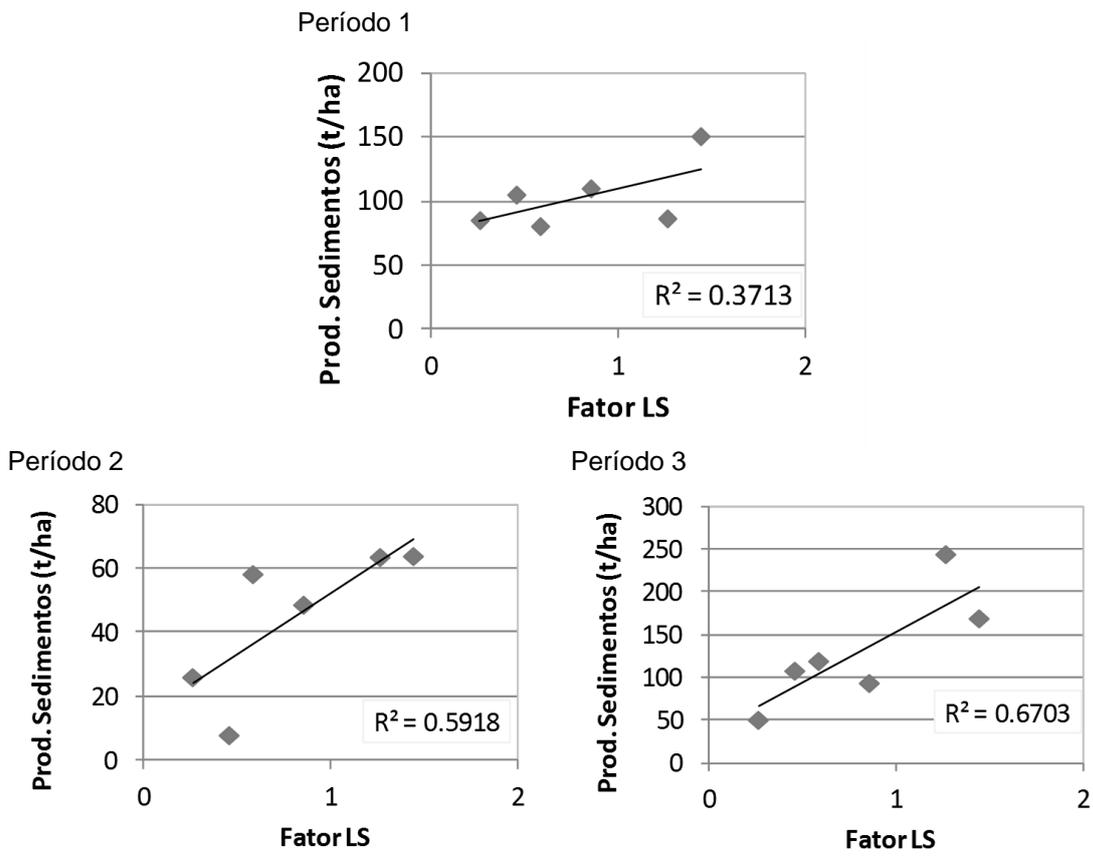


Figura 26 – Relação entre produção de sedimentos e o fator LS

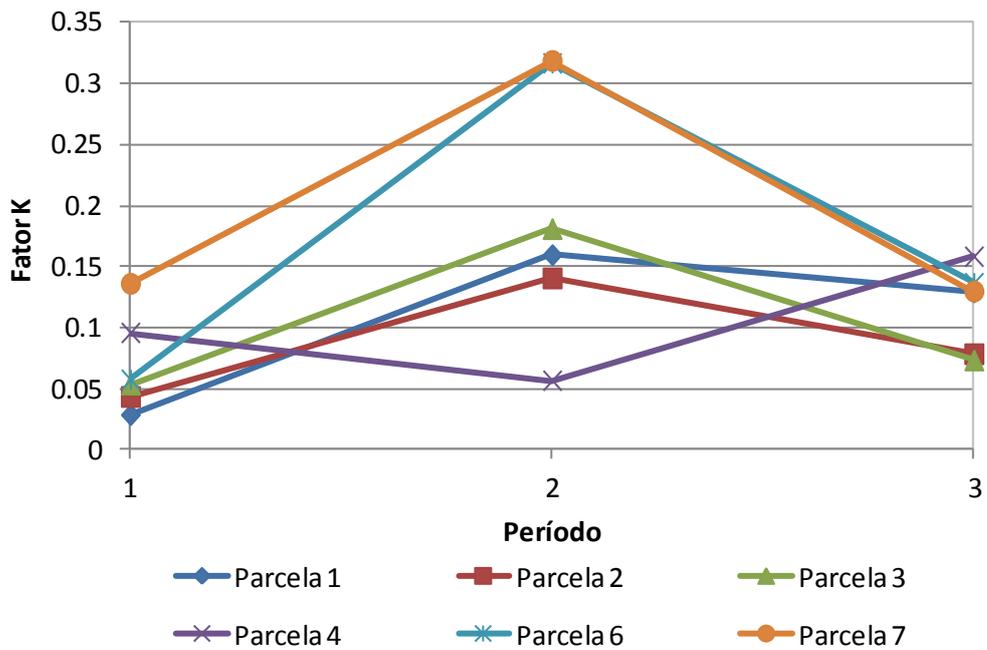


Figura 27 – Fator k ($t\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$) para cada período

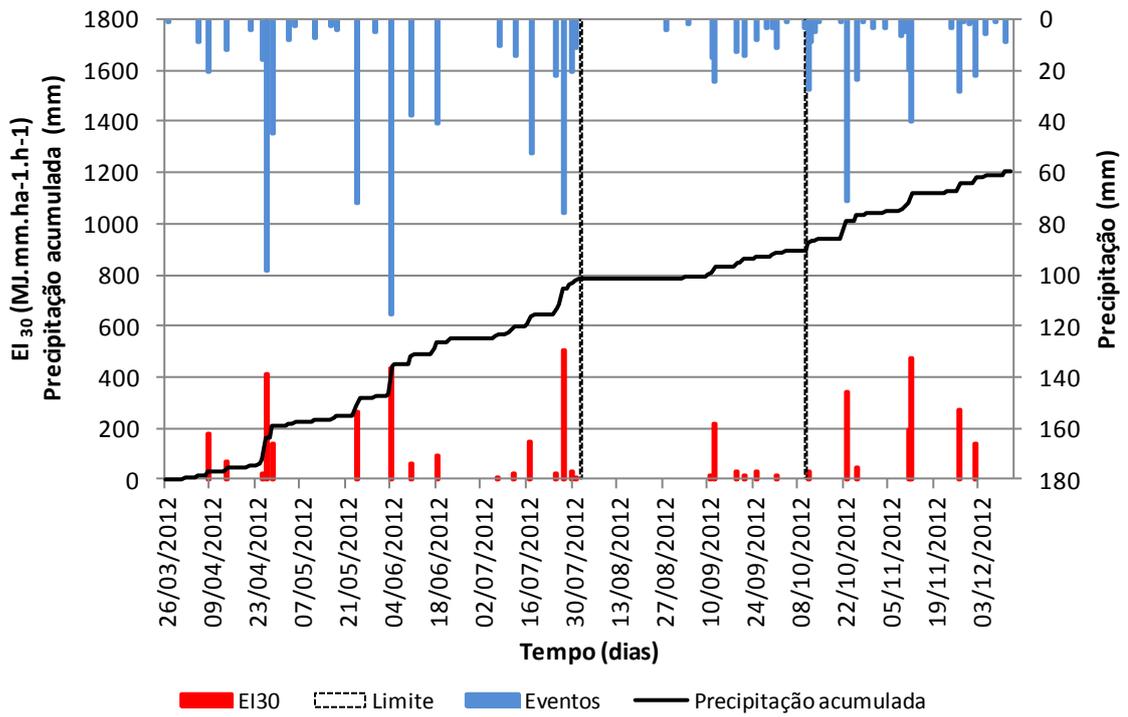


Figura 28 – Precipitação e eventos erosivos durante o período estudado

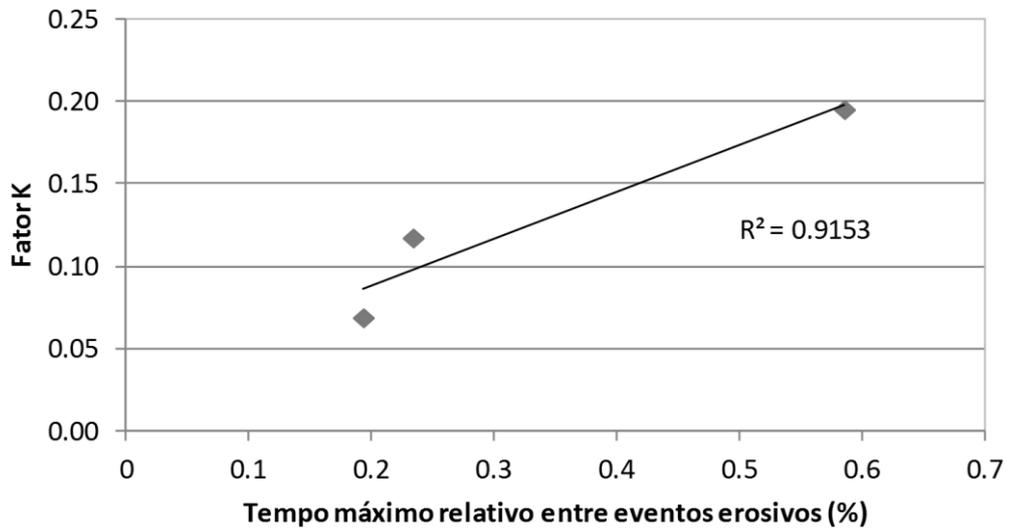


Figura 29 – Relação entre fator *K* e tempo máximo relativo entre eventos erosivos

5.2.1. EFEITO DA ADEQUAÇÃO DAS ESTADAS NA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

O trabalho de adequação do trecho resultou em mudanças no comprimento de rampa criando uma descontinuidade no trecho. Antes da adequação o trecho possuía 491m de comprimento e apresentava juntamente com o aumento progressivo da declividade um incremento contínuo de comprimento de rampa (Figura 30).

Com a adequação do trecho foi eliminada a parte final da rampa, diminuindo o comprimento do trecho para 338m dos quais 275 foram monitorados. No entanto a modificação de maior relevância foi à instalação das lombadas e caixas de contenção, que por não permitirem a continuidade do escoamento, atuam como barreiras que segmentam o leito. Desta forma o comprimento de rampa é nulo logo após cada lombada, aumentando gradualmente até a próxima (Figura 31). Assim, espera-se diminuição considerável da produção de sedimentos da estrada, pois a erosão é condicionada principalmente pelo comprimento de rampa e pela declividade (LUCE e BLACK, 1999).

Para o período estudado as medições indicaram uma produção de sedimentos de 265 t/ha. No cenário sem a adequação, considerando a rampa contínua, para o mesmo período foi estimada utilizando a USLE uma produção de 690 t/ha. Sendo assim a adequação deste trecho resultou em uma diminuição de 62% na produção de sedimentos.

Tabela 11 – Parâmetros utilizados e estimativa do efeito da adequação na diminuição da erosão

Parcela*	Fator K	Fator LS		Produção de sedimentos (t/ha)	
		Com adequação	Sem adequação	Com adequação	Sem adequação
7	0.15	0.26	0.26	163	163
6	0.10	0.58	0.94	259	417
5	0.11**	0.36	0.59	174	276
4	0.12	0.46	0.96	222	468
3	0.07	0.85	2.26	253	669
2	0.06	1.44	4.89	385	1306
1	0.07	1.26	4.88	396	1529
Total				265	690

*ordenadas no sentido de montante a jusante

**média das parcelas 4 e 6

Comparando um trecho sem adequação e um adequado com caixas de contenção com espaçamento de 50m Corrêa e Dedecek, (2008) observaram uma diferença de redução de 167% na produção de sedimentos.

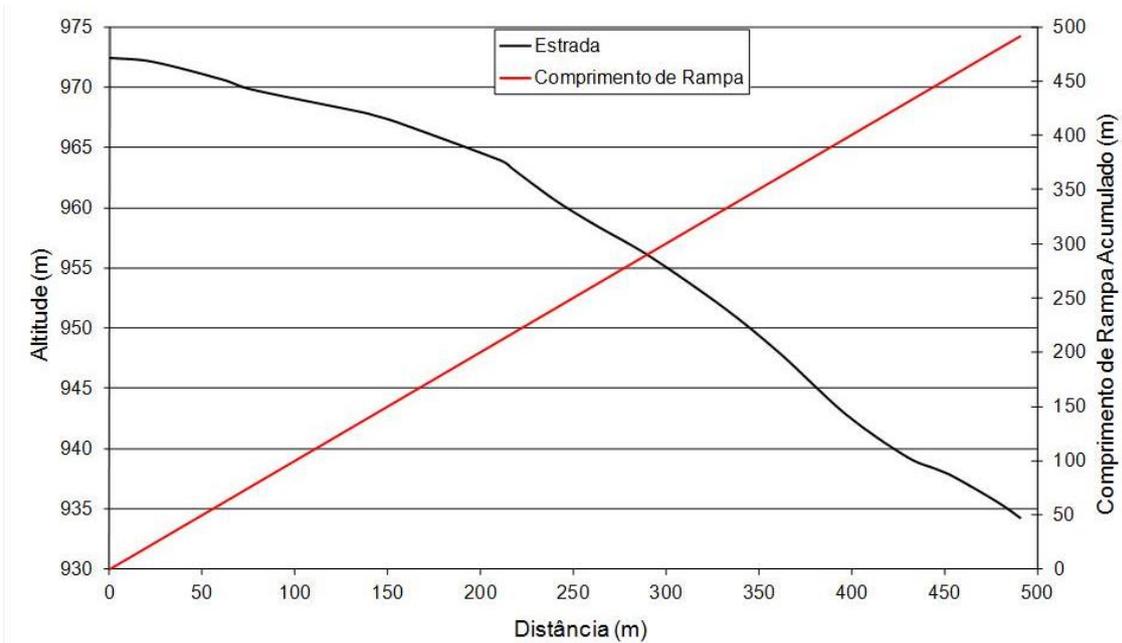


Figura 30 – Perfil longitudinal do trecho experimental anterior à adequação

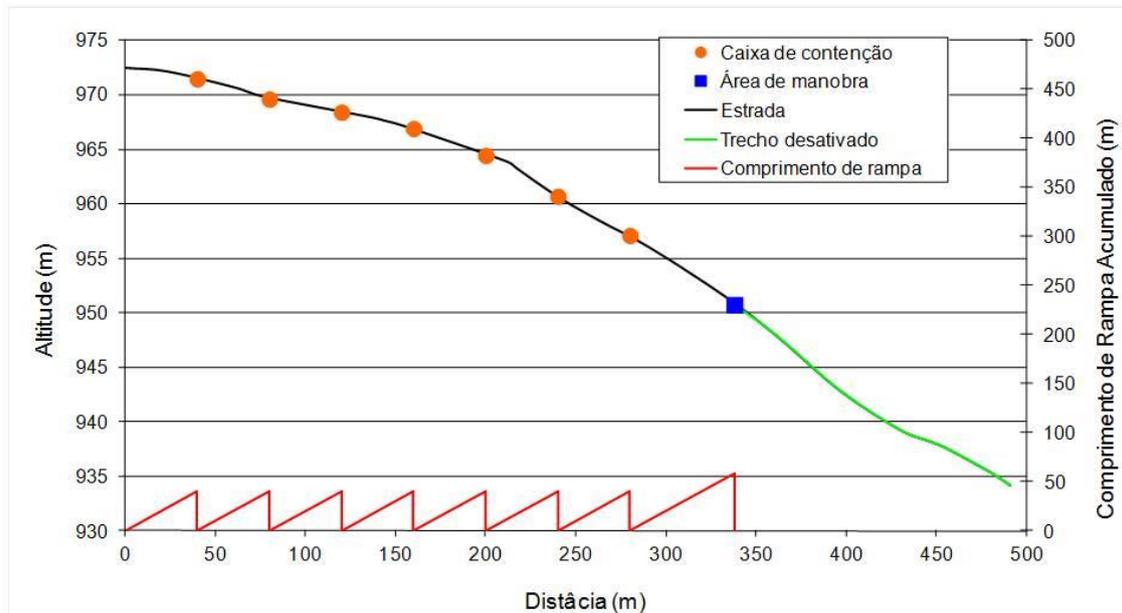


Figura 31 - Perfil longitudinal do trecho experimental após a adequação

5.3. PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM EVENTOS

O MAASPE instalado na parcela 5 registrou o escoamento e a concentração de sedimentos no período de 31/01/2013 a 20/02/2013. Foram registrados 6 eventos de precipitação com geração de escoamento e produção de sedimentos (

Tabela 12). Os eventos observados apresentaram precipitação acumulada variando entre 2 e 15,5 mm. A intensidade máxima em 1 min apresentou valores entre 15 e 76 mm.h⁻¹. Coeficiente de escoamento dos eventos apresentou valores elevados sendo observados coeficientes de 0,5 a 0,9. Estes valores estão coerentes com outros estudos que consideraram o escoamento em estradas não pavimentadas. Sheridan *et al.*, (2008) em estudo utilizando simulador de chuva em estradas não pavimentadas encontraram coeficientes de escoamento de 0,86 a 0,95. Ziegler *et al.* (2001b) em estudo semelhante observou coeficiente de escoamento de 0,84. Estes dados confirmam a baixa taxa de infiltração durante os eventos e confirma a importância das estradas como fonte de escoamento superficial hortoniano.

Os eventos são apresentados nas Figura 32 a Figura 37. Observa-se que nos eventos em que a chuva foi concentrada e ocorreu apenas um pico de escoamento e o pico da concentração de sedimentos ocorreu imediatamente antes do pico do escoamento. Este comportamento foi também observado em outros estudos (COSTANTINI *et al.*, 1999; ZIEGLER *et al.*, 2001a; FOLTZ *et al.*, 2009; SHERIDAN *et al.*, 2008)

Ziegler *et al.* (2000a) afirmam que a redução, mesmo com o aumento do escoamento, se dá em função dos sedimentos depositados na superfície da estrada. No início do evento, este material, que não apresenta resistência á erosão, tem seu transporte condicionado pela capacidade de transporte do escoamento. Na continuidade do evento, este material prontamente disponível para o transporte é gradativamente retirado da superfície, expondo o material consolidado do leito da estrada, e desta forma a ocorrência de outro pico de concentração de sedimentos fica condicionada a capacidade de erosão do escoamento.

Os eventos 3 e 5 (Figura 34Figura 36) exemplificam a relação entre o transporte de sedimentos prontamente disponíveis, capacidade de transporte e erosão do escoamento. No evento 3 o início do escoamento no tempo 25 min causa um pico inicial de concentração de sedimentos que decresce até atingir cessar aproximadamente no tempo 70 min. No entanto, a ocorrência de outro pico de

escoamento, maio que o primeiro ($2,27 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$), causou um pico de concentração maior que o primeiro. Tendo este segundo pico atingido uma vazão alta, a concentração de sedimentos não ficou condicionada apenas a disponibilidade de sedimentos para o transporte, podendo ter ocorrido erosão causada pelo escoamento.

No evento 5 a ocorrência de quatro picos de magnitude pouco diferente ilustram a limitação do processo de produção de sedimentos pela disponibilidade de material. A ocorrência de picos de escoamento proporcionais não é capaz de gerar picos de concentração de sedimentos com resposta equivalente.

A relação entre vazão e concentração de sedimentos indica a forma em que ocorre os processos de erosão e transporte dos sedimentos (WILLIAMS, 1989). Esta relação é apresentada para os seis eventos na Figura 38. Percebe-se que ocorre histerese entre as duas grandezas, ou seja, os valores de concentração de sedimentos durante a fase de ascensão e recessão do hidrograma são diferentes.

Tabela 12 – Resumos dos eventos monitorados

Evento	P_p (mm)	I_{1min} (mm/h)	Q (mm)	CE	Perda inicial ¹ (mm)	Sed total (kg)	Cs Max (mg/L)	Duração do escoamento	
								Início	Fim
1	13,0	30	11,3	0,9	1,6	1,13	3084	03/02/13 21:24:43	03/02/13 23:59:39
2	8,6	15	6,4	0,7	2,2	0,10	542	07/02/13 17:49:41	08/02/13 07:59:32
3	15,5	76	13,6	0,9	1,8	2,22	3235	08/02/13 13:12:34	08/02/13 16:12:40
4	2,0	15	1,1	0,5	1,0	0,02	328	10/02/13 12:06:45	10/02/13 14:49:58
5	6,6	15	3,9	0,6	2,7	0,06	371	12/02/13 17:25:48	13/02/13 06:24:07
6	6,9	61	4,3	0,6	2,5	0,99	2873	14/02/13 14:54:00	14/02/13 15:20:54

* P_p é a precipitação; I_{1min} é a intensidade de precipitação máxima em 1 min; Q é o escoamento; CE é o coeficiente de escoamento; Cs max é a concentração de sedimentos máxima; Sed total é a produção de sedimentos acumulada no evento

¹ Corresponde à infiltração durante o evento e é dado pela diferença entre P_p e Q.

De acordo com William (1989) a relação entre vazão e concentração de sedimentos pode apresentar, além da relação linear, três formas de curvas de histerese, sendo elas, laço em sentido horário, laço em sentido anti-horário, e laço em oito. Para todos os seis eventos foi observada uma relação em forma de laço em sentido horário em que no início de cada evento a concentração de sedimentos é maior e na recessão do hidrograma é reduzido. Essa forma de histerese pode estar associada à proximidade da fonte de sedimentos, à exaustão dos suprimentos de sedimentos em eventos com mais de um pico de vazão (SMITH e DRAGOVICH, 2009) ou a diminuição da intensidade da precipitação durante a recessão do hidrograma

(GREGORY e WALLING, 1973). Essas características são observadas na parcela monitorada e dão suporte a ocorrência de transporte inicialmente ocorrer devido à mobilização dos depósitos de sedimentos presentes na superfície do leito da estrada.

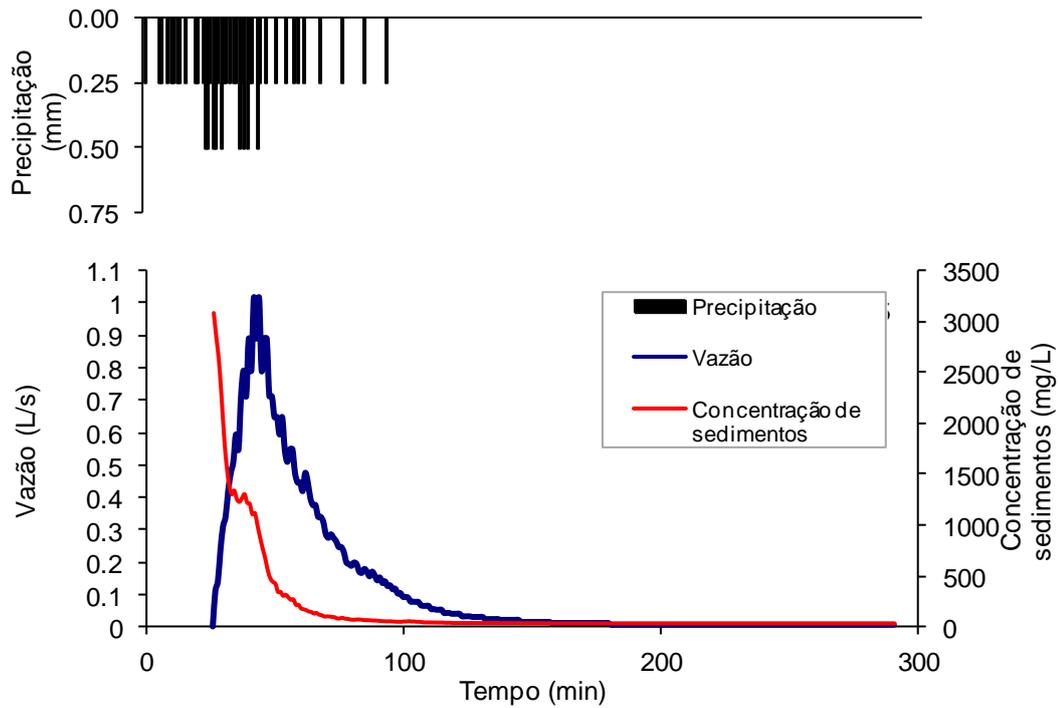


Figura 32 – Escoamento e concentração de sedimentos observados no evento 1

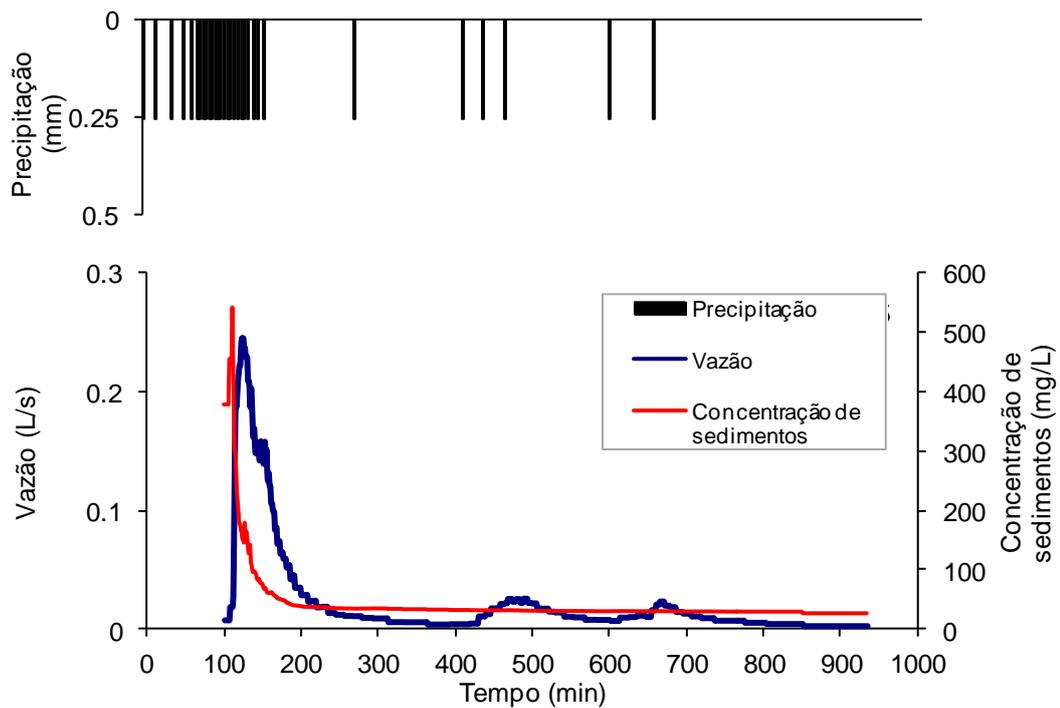


Figura 33 – Escoamento e concentração de sedimentos observados no evento 2

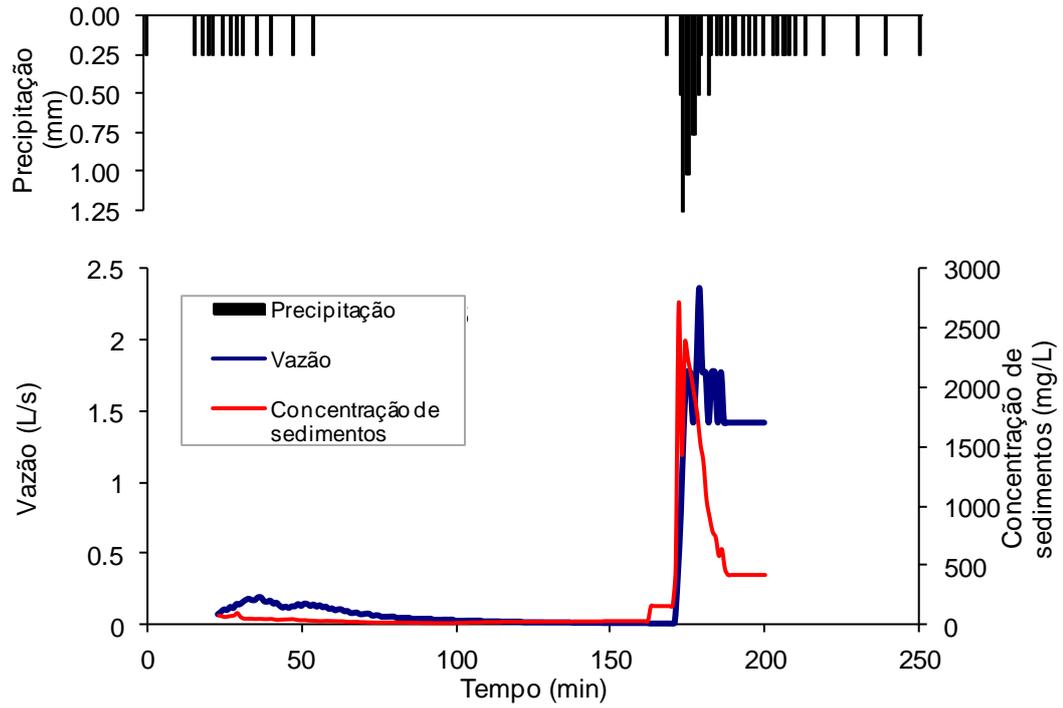


Figura 34 – Escoamento e concentração de sedimentos observados no evento 3

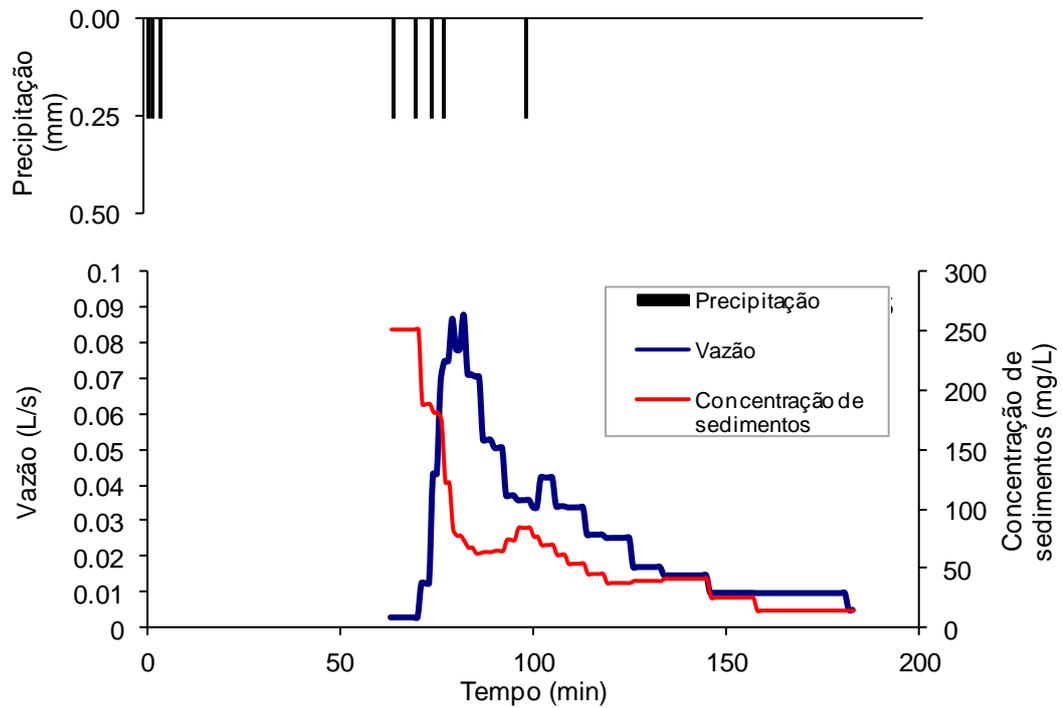


Figura 35 – Escoamento e concentração de sedimentos observados no evento 4

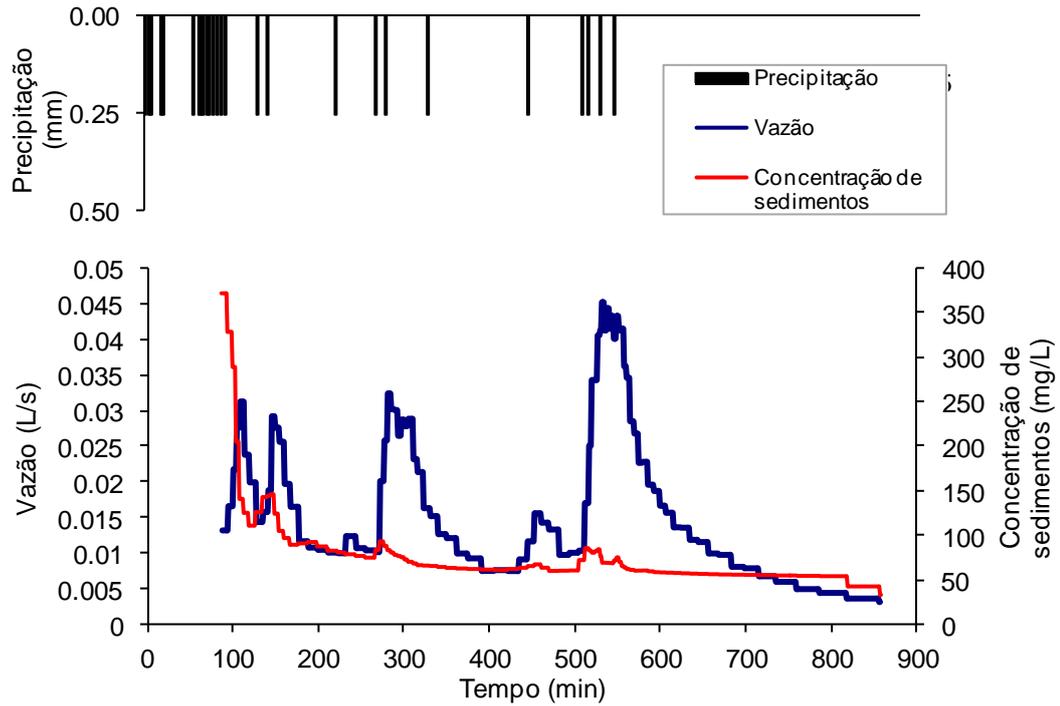


Figura 36 – Escoamento e concentração de sedimentos observados no evento 5

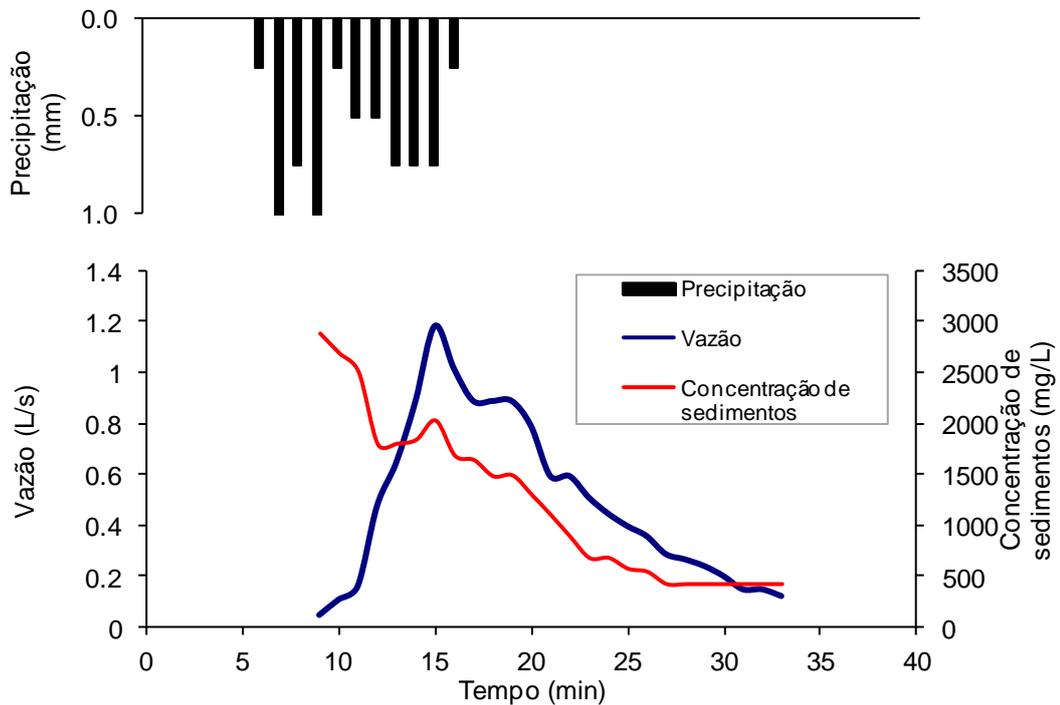


Figura 37 – Escoamento e concentração de sedimentos observados no evento 6

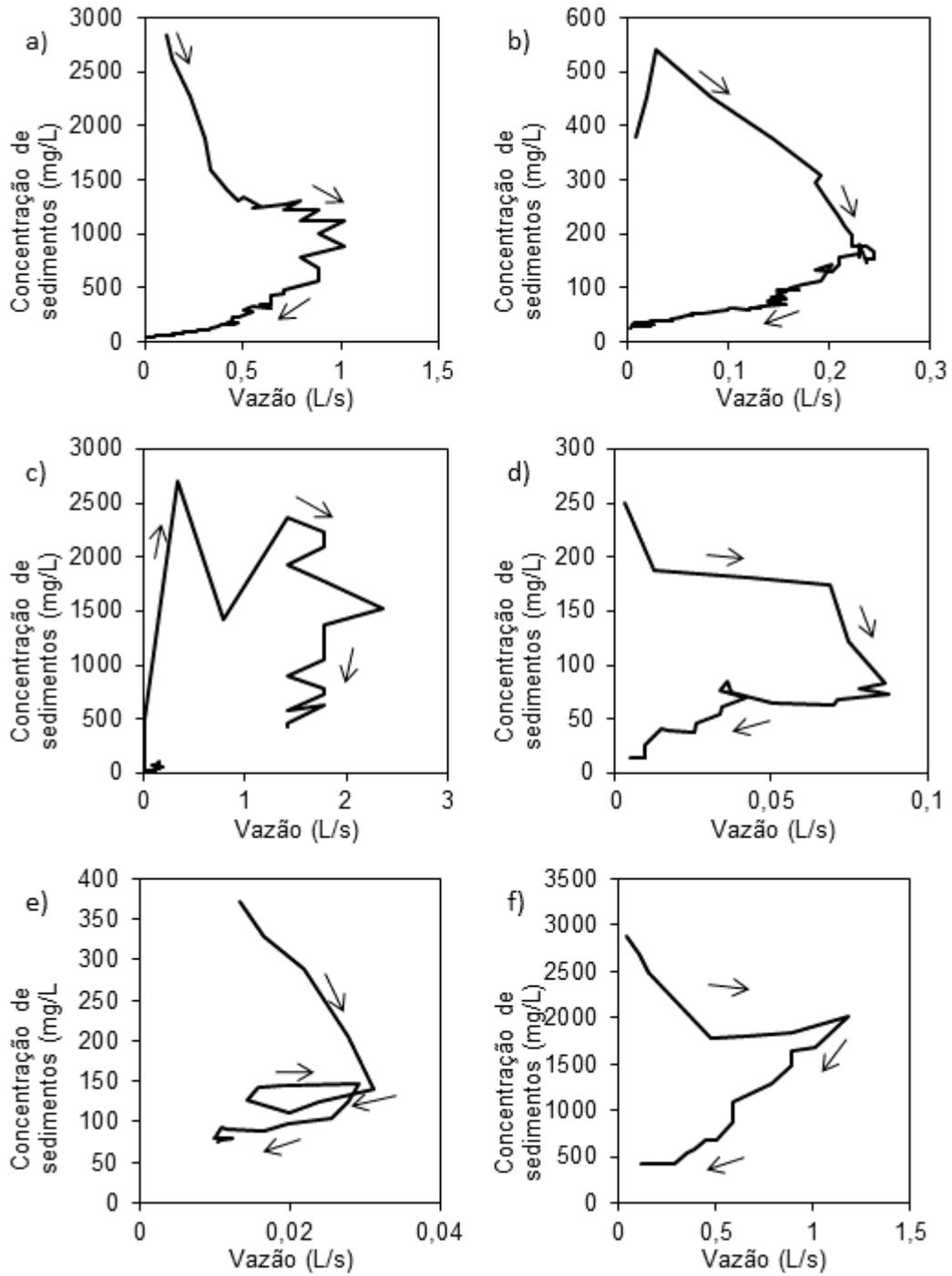


Figura 38 – Relação entre vazão e concentração de sedimentos nos eventos observados

5.4. SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM EVENTOS COM O MODELO LISEM

O modelo foi calibrado para o evento 2. Este evento foi selecionado para a calibração por ter longa duração, mais de um pico de escoamento e apresentar baixa produção de sedimentos, visto que foi observada dificuldade na representação de eventos com tais características. Os parâmetros utilizados nas simulações e valores calibrados são apresentados na Tabela 13.

Os parâmetros n e K_{sat} foram calibrados inicialmente tendo em vista o ajuste do hidrograma e do balanço hídrico. O parâmetro θ_i (umidade inicial) foi utilizado para ajustar a infiltração simulada aos valores de perda inicial, que representam a diferença entre a precipitação e o escoamento.

Tabela 13 – Valores iniciais e calibrados dos parâmetros do modelo LISEM

Parâmetro	Valor		Fonte*
	Inicial	Calibrado	
RR	0,01	-	Takken <i>et al.</i> (1999)
n	0,01	0,161	Takken <i>et al.</i> (1999)
Coh (KPa)	12	-	Horn e Fleige (2003)
$Aggregates$	200	-	Kværnø e Stolte (2012) Takken <i>et al.</i> (1999)
D_{50} (μm)	30	-	Medido
K_{sat} ($mm \cdot h^{-1}$)	15,2	0,152	Medido
Ψ (cm)	11,1	-	Calculado. Rawls <i>et al.</i> (1983)
θ_{s1}	0,37	-	Medido
θ_{i1}	0,37	0,1 a 0,17	-
$soildep1$	1000	-	-

* Refere-se ao valor inicial

No entanto, o parâmetro n foi calibrado também tendo em vista sua influência na produção de sedimentos. As pequenas velocidades de escoamento observadas durante os eventos de menor magnitude foram o fator limitante para a ocorrência do transporte de sedimentos. Modificações nos parâmetros de coesão (Coh) e estabilidade de agregados para a erosão por salpicamento ($Aggregates$) não apresentaram sensibilidade, e sendo assim, o ajuste foi realizado apenas no parâmetro n . Os hidrogramas e sedimentogramas simulados são apresentados nas Figuras 39 e 44.

As simulações de escoamento apresentam coeficiente de eficiência (*COE*) entre -2,45 a 0,74 (Tabela 14). A grande variação de *COE* indica que o ajuste do hidrograma não foi adequado para todos os eventos simulados. A variação temporal nas simulações de transporte de sedimentos até o ponto de medição também não foram satisfatórias apresentando valores negativos de *COE* (Tabela 14). Entretanto, avaliando o escoamento total, vazão de pico, infiltração total, e produção de sedimentos acumulados nos eventos as simulações apresentarão valores mais próximos aos observados quando comparados aos resultados da variação temporal (Figura 45).

Tabela 14 – Valores observados e simulados com o modelo LISEM

Evento	P_p (mm)	Q (mm)			Total de Sedimentos (Kg)			Q pico (L/s)		Tempo de pico Q (min)		Perda inicial (mm)	I_{sim} (mm)
		Obs.	Sim.	<i>COE</i>	Obs.	Sim.	<i>COE</i>	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.		
1	13,0	11,3	10,8	0,48	1,13	4,71	-9,8	1,01	1,19	42	32	1,6	2,1
2	8,6	6,4	5,2	-0,03	0,10	0,04	-2,1	0,24	0,32	123	117	2,2	3,5
3	15,5	13,6	12,8	0,74	2,22	6,63	-1,5	2,37	2,23	179	178	1,8	2,6
4	2,0	1,1	1,7	0,63	0,02	0,00	-	0,09	0,14	82	82	1,0	0,4
5	6,6	3,9	2,2	-2,45	0,06	0,00	-	0,05	0,16	532	80	2,7	4,4
6	6,9	4,3	5,4	-0,42	0,99	3,00	-12	1,18	1,86	15	15	2,5	1,3

* P_p é a precipitação; Q é o escoamento superficial; Q pico é a vazão de pico; I_{sim} é a infiltração total simulada

As características de escoamento total e vazão de pico foram bem representadas nas simulações, como mostrado nas Figura 45a e 39b. A infiltração simulada, comparada a perda inicial, foi superestimada nas simulações (Figura 45c). Sendo assim, mesmo com ajuste não adequado para a forma do hidrograma de alguns eventos, o modelo foi capaz de reproduzir o comportamento geral do escoamento na parcela.

O K_{sat} foi calibrado com valor cem vezes menor do que o medido, aproximando-se dos valores relatados em outros estudos, nos quais a condutividade hidráulica nas estradas apresentaram valores menores que 1 mm.h^{-1} (ELLIOT, 1999; LUCE e CUNDY, 1994). Desta forma acredita-se que o método dos anéis concêntricos causa um distúrbio na superfície da estrada modificando a característica de selamento pela compactação e criando caminhos preferências durante a fixação dos anéis. Neste sentido, a utilização de amostras indeformadas em anéis volumétricos e a

determinação da condutividade hidráulica saturado com o uso de permeâmetros, pode trazer resultados mais próximos aos valores calibrados.

Na relação entre produção de sedimentos observada e simulada (Figura 45d) percebe-se a tendência do modelo superestimar a produção simulada. No entanto, observa-se que a tendência é válida apenas para os eventos em que a produção foi de maior magnitude (eventos 1, 3 e 6), enquanto para os eventos menores a produção de sedimentos simulada foi nula ou próxima de zero (eventos 2, 4 e 5). Este resultado se explica pela utilização do mesmo valor do parâmetro coesão do solo (*Coh*) para todos os eventos. Desta forma evidencia-se que o modelo não é capaz de simular a variação na disponibilidade de sedimentos que no início do evento tem transporte facilitado pela disponibilidade de material desagregado e sofre redução juntamente no final do evento. Esta característica é mais relevante para os eventos de menor magnitude em que uma pequena quantidade de escoamento, aliada a baixa resistência ao transporte dos depósitos, produz sedimentos de forma que não ocorreria se a produção de sedimentos nesses eventos estivesse condicionada a ocorrência de erosão na superfície.

Portanto um valor único de coesão não é capaz de representar a ocorrência da produção de sedimentos em estradas, pois esta é uma característica dinâmica em função das propriedades da quantidade de sedimentos depositados e da coesão do material do leito da estrada. A característica dinâmica da coesão em estradas foi abordada por Ziegler *et al* (2001b), que observaram melhora nas simulações da produção de sedimentos do modelo KINEROS2 com a utilização de valor dinâmico da erodibilidade da superfície da estrada.

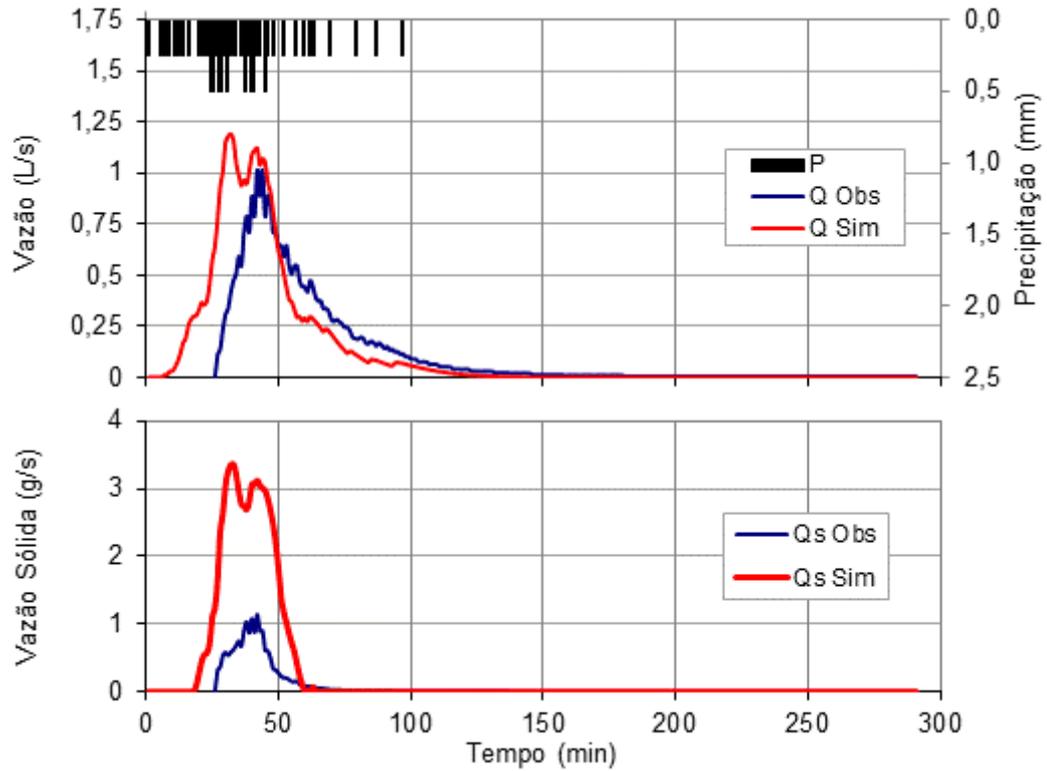


Figura 39 – Hidrogramas e sedimentogramas observados e simulados do Evento 1

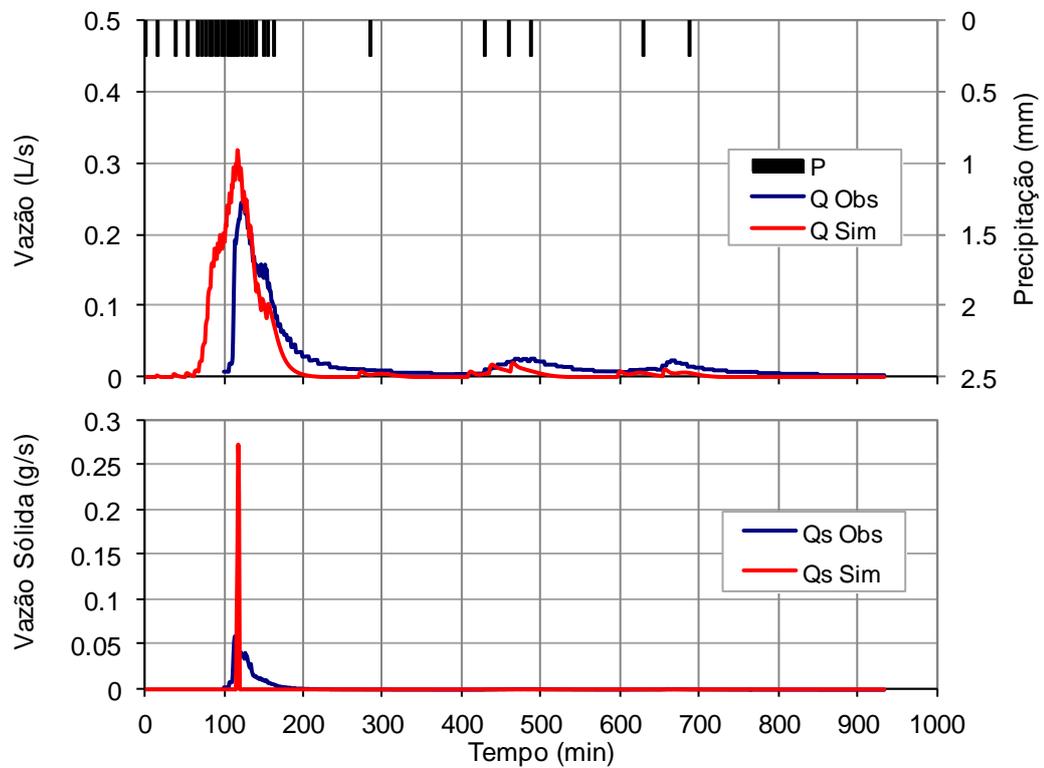


Figura 40 - Hidrogramas e sedimentogramas observados e simulados do Evento 2

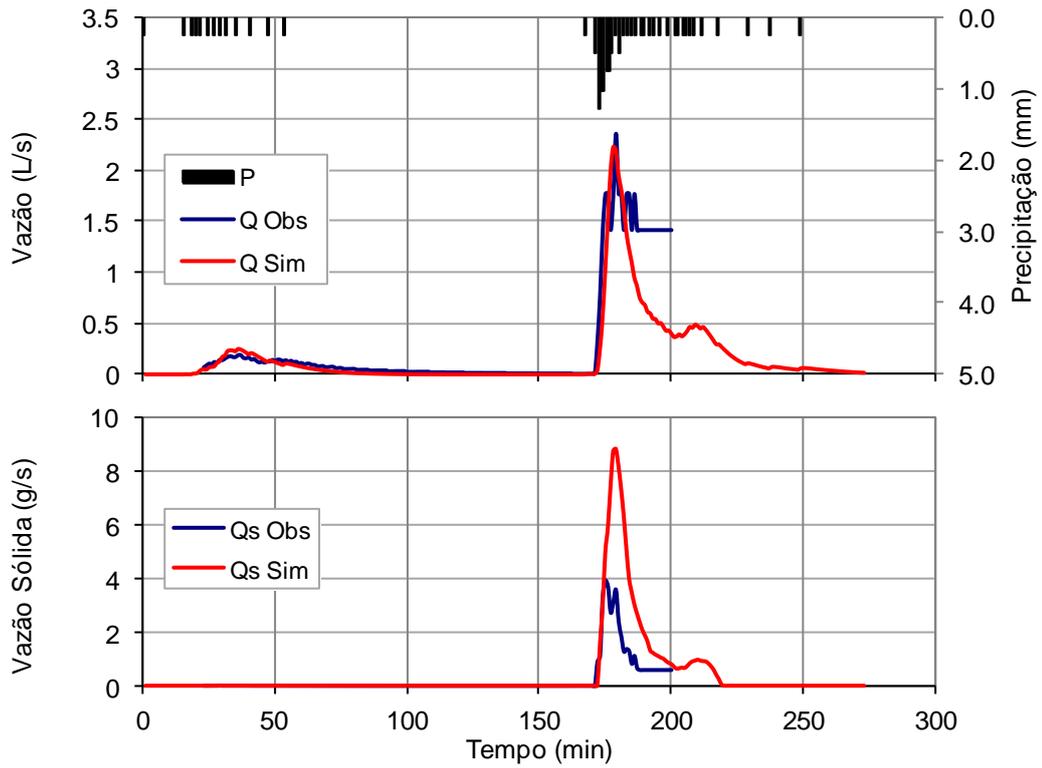


Figura 41 - Hidrogramas e sedimentogramas observados e simulados do Evento 3

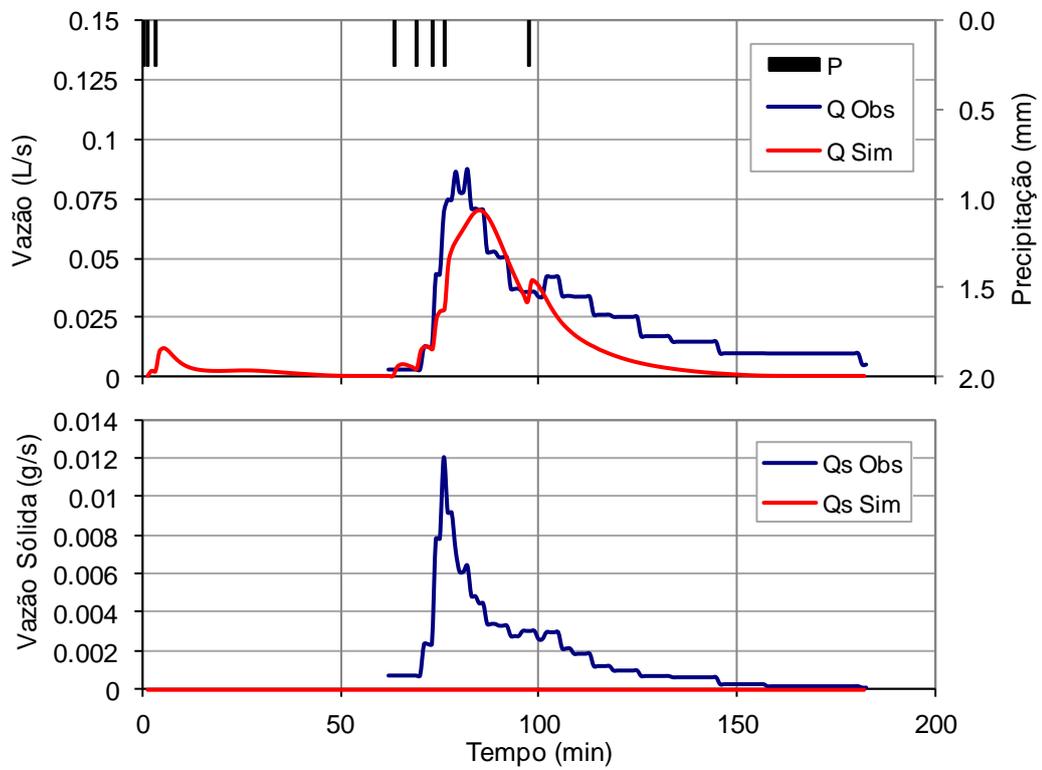


Figura 42 - Hidrogramas e sedimentogramas observados e simulados do Evento 4

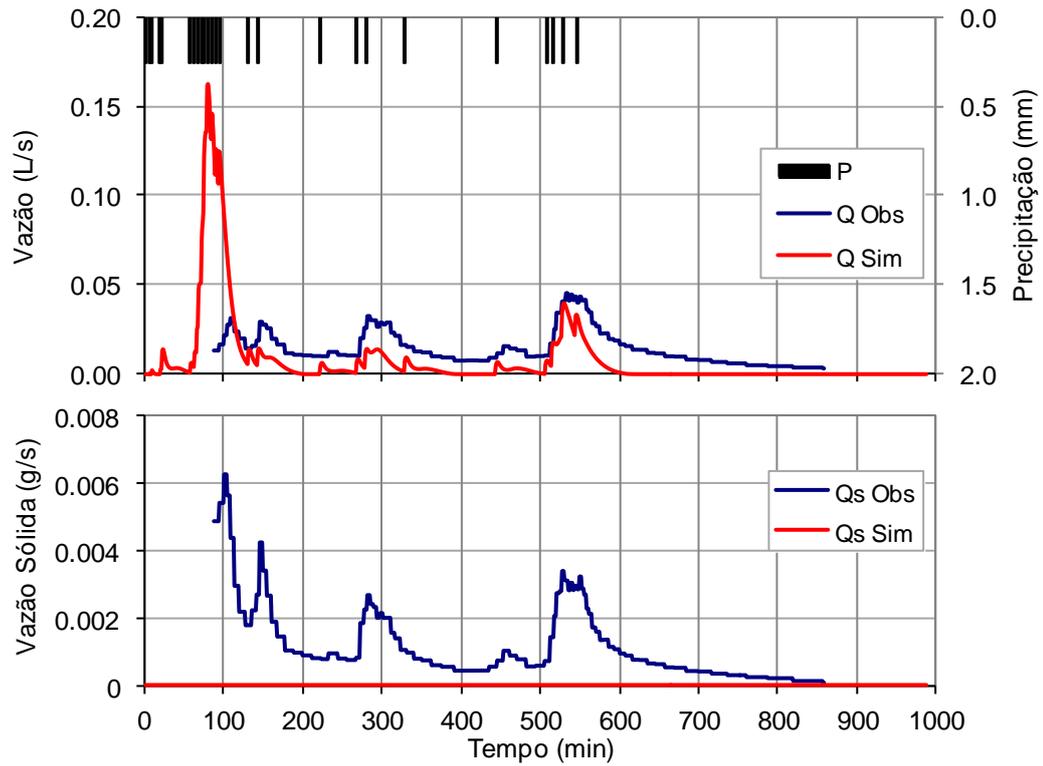


Figura 43 - Hidrogramas e sedimentogramas observados e simulados do Evento 5

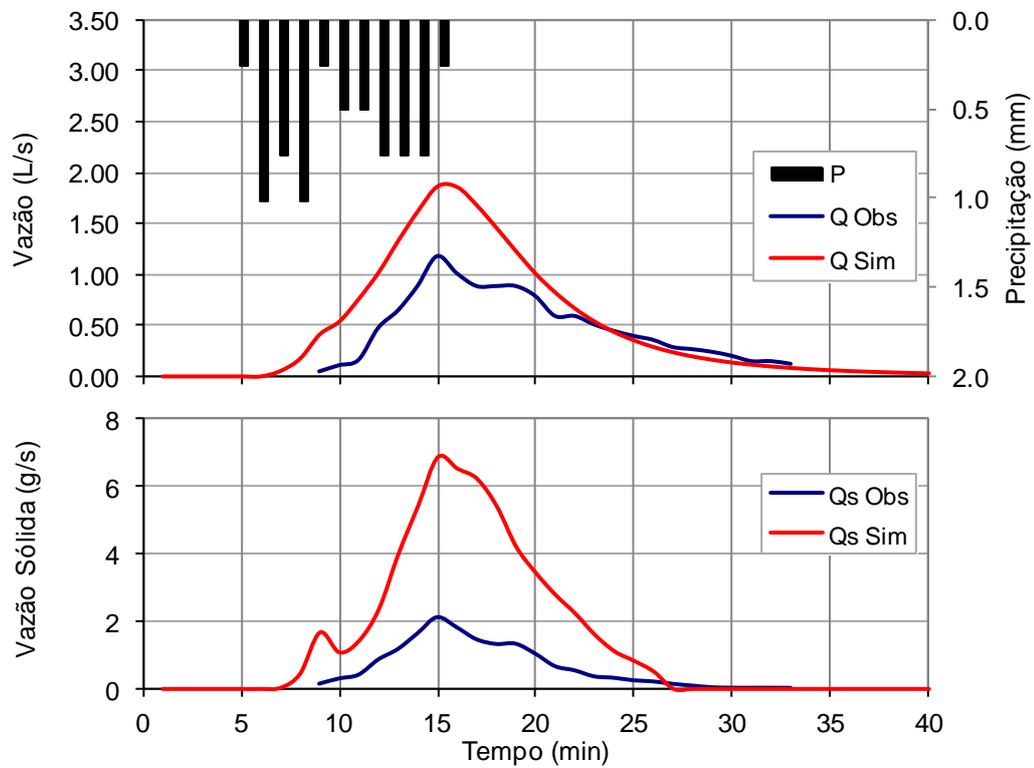


Figura 44 - Hidrogramas e sedimentogramas observados e simulados do Evento 6

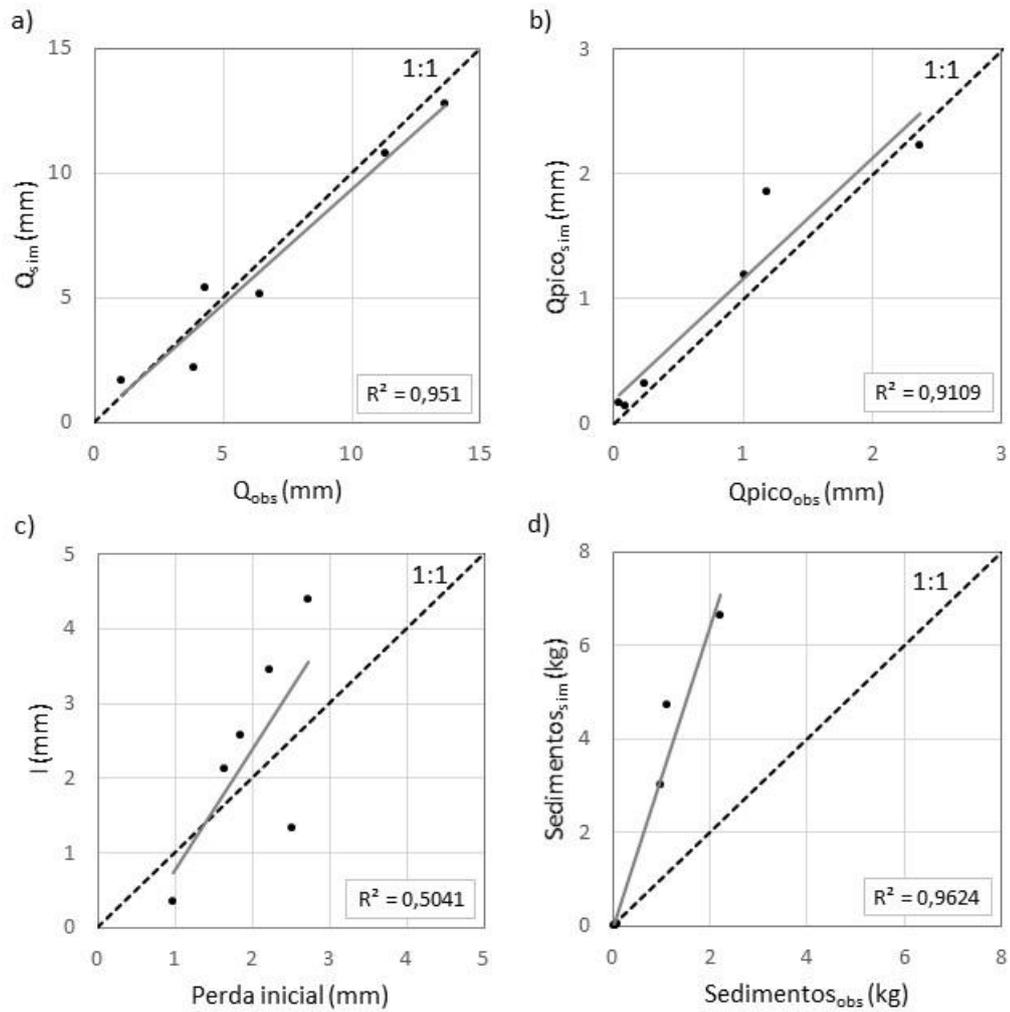


Figura 45 – Avaliação das simulações: a) avaliação das simulações de escoamento (Q); b) avaliação das simulações de escoamento de pico (Qpico); c) avaliação das simulações de produção de sedimentos

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho um trecho de estrada não pavimentada passou por adequação com construção de lombada e caixas de contenção, definindo parcelas individuais que foram utilizadas para o monitoramento da produção de sedimentos. O monitoramento das caixas de contenção possibilitou a obtenção de dados sobre a produção de sedimentos acumulados para três períodos distintos. Em uma das caixas de contenção foi observada as medições do acúmulo de sedimentos não foi realizada devido à lamina de água acumulada acima da superfície do depósito, constituindo assim uma limitação deste método devido às condições de drenagem (infiltração) impossibilitando as medições.

As parcelas de estudo apresentam solo com textura franco-siltosa não havendo variação expressiva na granulometria entre as parcelas e em relação ao solo da área externa à estrada. Comparando granulometria do material disponível nas parcelas e os sedimentos acumulados nas caixas de contenção não foi observada tendência de mudança.

Em relação à infiltração, observou-se que, comparando as parcelas de estrada às áreas externas, as estradas apresentaram VIB menor e decréscimo da taxa de infiltração é mais rápido.

Os valores calculados do fator K para o período variaram entre 0,06 e 0,15 t h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹, com média de 0,096. O fator K apresentou relação positiva com o tempo entre eventos erosivos. A relação entre a produção de sedimentos e o fator LS aumentou do primeiro para o terceiro período de medição indicando o aumento da influência dos fatores topográficos e a diminuição dos efeitos da intervenção causada pela manutenção do trecho.

Utilizando a USLE foi estimada uma redução de 62% na produção de sedimentos após a adequação do trecho estudado, demonstrando a efetividade das medidas de conservação da estrada para a redução do potencial de contribuição de sedimentos provenientes de estradas.

O monitoramento de eventos utilizando o MAASPE apresentou bons resultados e possibilitou a análise da produção de escoamento e sedimentos. Observou-se nos eventos a tendência da ocorrência de picos de concentração de sedimentos antes do pico de escoamento evidenciando a importância do material prontamente disponível na produção de sedimentos.

As simulações com o modelo LISEM apresentaram bons resultados na simulação de escoamento. Para a produção de sedimentos em eventos com produção de sedimentos pequena o modelo subestimou a produção e o inverso ocorreu nos eventos com maior produção de sedimentos. Foi evidenciado com os resultados das simulações o caráter dinâmico da coesão do solo nas simulações da produção de sedimentos.

7. RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos, o presente trabalho recomenda para estudos futuros:

- realizar o monitoramento por período mais longo para verificar o tempo de influência da manutenção para determinar o impacto dos sedimentos e prever a vida útil das caixas de contenção;
- monitorar mais eventos a fim de obter diferentes condições de precipitação, umidade antecedente e produção de sedimentos.
- medir em campo todos os parâmetros considerados na modelagem;
- calibrar modelo LISEM por grupos de eventos diferenciados pela magnitude da produção de sedimento a fim de identificar as variações nos parâmetros que controlam a produção de sedimentos,

8. REFERÊNCIAS

- ANDERSON, D. M.; MACDONAL, L. H. Modelling road surface sediment production using a vector geographic information system. **Earth surface processes and landforms**, v. 23,. p. 95-107, 1988.
- BERTOLINI, D.; DRUGOWICH, M. I.; LOMBARDI NETO, F.; BELLINAZZI JR, R. Controle de erosão em estradas rurais. In: BERTOLINI, D.; KROLL, F. M.; LOMBARDI NETO, F. et al. (Eds.). **Manual técnico de manejo e conservação de solo e água**. Campinas: CATI,. p. 24, 1994 (Manual técnico, 42).
- BEVEN, K. Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system. **Hydrological Processes**, v. 16, n. 2, p. 189-206, 2002.
- BORDAS, M.P.; SEMMELMANN, F.R. Elementos de engenharia de sedimentos. In: TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFGS; São Paulo: USP/ABRH,. 1993. p.915-43,.
- BUBLITZ, U.; CAMPOS, L. DE C. **Adequação de estradas rurais em microbacias hidrográficas: especificações de projetos e serviços**. Curitiba: EMATER-Pr, 1992.
- CARVALHO, N. DE O. **Hidrossedimentologia Prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 1994.
- CAUDURO, F.A.; DORFMAN, R. **Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem**. Porto Alegre: PRONI/ IPH-UFRGS, 1986.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. Boston: McGraw-Hill, 1988.
- CORRÊA, C. M. C.; DEDECEK, RENATO ANTONIO. Erosão real e estimada através da rusle em estradas de uso florestais , em condições de relevo plano a suave ondulado. **Floresta**, v. 39, n. 2, p. 381-391, 2008.
- CORRÊA, C. M. C.; DEDECEK, RENATO ANTÔNIO; ROLOFF, G. Sedimentos provenientes de estradas de uso florestal em condições de relevo ondulado a fortemente ondulado. **Floresta**, v. 40, n. 1, p. 221-234, 2009.
- COSTANTINI, A.; LOCH, R. J.; CONNOLLY, R. D.; GARTHE, R. Sediment generation from forest roads: bed and eroded sediment size distribution, and runoff management strategies. **Australian Journal of Soil Research**, v. 37, p. 947 - 964, 1999
- CROKE, J.; NETHERY, M. Modelling runoff and soil erosion in logged forests: scope and application of some existing models." **Catena** n. 67, p. 35-49, 2006.
- CROKE, J.; MOCKLER, S. Gully initiation and road-to-stream linkage in a forested catchment, southeastern Australia. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 26, n. 2, p. 205-217, 2001.

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.

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.

DEMARCHI, L. C.; RABELLO, L. R.; SANTOS, N. B. DOS; FRANCO, O.; CORREA, R. O. **Adequação de Estradas Rurais**. Campinas: CATI, 2003.

DUBÉ, K.; MEGAHAN, W.; MCCALMON, M. **Washington Road Surface Erosion Model (WARSEM) Manual**, State of Washington, Department of Natural Resources, 2004.

DUNNE, T. Sediment yield and land use in tropical catchments. **Journal of Hydrology**, v. 42, p. 281-300, 1979.

DNIT - **Relatório de Extensões do Sistema Rodoviário Nacional**, versão 2009.

EATON, R. A.; GERARD, S.; CATE, D. W. **Rating unsurfaced roads: A field manual for measuring maintenance problems**. . [S.l: s.n.]. , 1988

ELLIOT, WILLIAM J; FOLTZ, RANDY B; LUCE, C. H. **Modeling Low-Volume Road Erosion**. Transportation Research Record, v. 2, n. 1652, p. 244-249, 1999.

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

FERRAZ, S. F. D. B.; MARSON, J. C.; FONTANA, C. R.; LIMA, W. DE P. Uso de indicadores hidrológicos para classificação de trechos de estradas florestais quanto ao escoamento superficial. **Scientia Forestalis**, n. 75, p. 39-49, 2007.

FOLTZ, R. B.; COPELAND, N. S.; ELLIOT, W. J. Reopening abandoned forest roads in northern Idaho, USA : Quantification of runoff, sediment concentration, infiltration, and interrill erosion parameters. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 8, p. 2542-2550, 2009.

FORSYTH, A. R.; BUBB, K. A.; COX, M. E. Runoff, sediment loss and water quality from forest roads in a southeast Queensland coastal plain Pinus plantation. **Forest Ecology and Management**, v. 221, n. 1-3, p. 194-206, 2006.

FU, B.; NEWHAM, L.T.H.; FIELD, J. B. Modelling erosion and sediment delivery from unsealed roads in southeast Australia. **Mathematics and Computers in Simulation**, v. 79, n. 9, p. 2679-2688, 2009.

FU, B.; NEWHAM, L. T.H.; RAMOS-SCHARRÓN, C.E. A review of surface erosion and sediment delivery models for unsealed roads. **Environmental Modelling & Software**, v. 25, n. 1, p. 1-14, 2010.

GARCIA, A. R.; MACHADO, C. C.; SILVA, E.; SOUZA, A. P.; PEREIRA, R. S. Volume de enxurrada e perda de solo em estradas florestais em condições de chuva natural. **Revista Árvore**, v. 27, n. 4, p. 535-542, 2003.

GOERL, R. F.; SIEFERT, C. A. C.; SCHULTZ, G. B.; SANTOS, C. S.; SANTOS, I. Elaboração e Aplicação de Índices de Fragmentação e Conectividade da Paisagem para Análise de Bacias Hidrográficas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 05, p. 1000-1012, 2011.

Govers, G. Empirical relationships on the transporting capacity of overland flow: **Int. Assoc. Hydrol. Sci. Pub.** 189, p. 45-63, 1990

GRAYSON, R. B.; HAYDON, S. R.; JAYASURIYA, M. D. A.; FINLAYSON, B. L. Water quality in mountain ash forests - separating the impacts of roads from those of logging operations. **Journal of Hydrology**, v. 150, p. 459-480, 1993.

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

GRIEBELER, N. P. **Modelo para o dimensionamento de redes de drenagem e de bacias de acumulação de água em estradas não pavimentadas**. [S.l:s.n.], 2002.

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.

GUCINSKI, H.; FURNISS, M.; ZIEMER, R.; BROOKES, M. **Forest Roads : A Synthesis of Scientific Information**. . Portland: [s.n.] , 2001

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.

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.

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.

HUDSON, N. W. **Field measurement of soil erosion and runoff**. Roma: FAO, 1993.

JETTEN, V. **LISEM user manual, version 2.x. Draft version** January 2002. Utrecht, Utrecht Centre for Environmental and Landscape Dynamics, Utrecht University, 2002.

JONES, J. A.; SWANSON, F. J.; WEMPLE, B. C.; SNYDER, K. A. I. U. Effects of Roads on Hydrology , Geomorphology , and Disturbance Patches in Stream Networks. **Conservation Biology**, v. 14, n. 1, p. 76-85, 2000.

JORDÁN-LÓPEZ, A.; MARTÍNEZ-ZAVALA, L.; BELLINFANTE, N. Impact of different parts of unpaved forest roads on runoff and sediment yield in a Mediterranean area. **The Science of the total environment**, v. 407, n. 2, p. 937-44, 2009.

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

KAHKLEN, K. A **Method for Measuring Sediment Production from Forest Roads**. United States Department of Agriculture, Research note PNW-RN-529 p. 1-19, 2001.

KELLER, G.; SHERAR, J. **LOW-VOLUME ROADS ENGINEERING: Best Management Practices Field Guide**. [S.I.]: US Agency for International Development, 2003.

Kobiyama, M.; de Almeida Mota, A.; Grison, F.; Giglio, J. N. Landslide influence on turbidity and total solids in Cubatão do Norte River, Santa Catarina, Brazil. **Natural hazards**, 59(2), p. 1077-1086, 2011.

KÖPPEN, W. Das geographischa System der Klimate.Gebr, **Borntraeger**, pp. 1-44, 1936.

KVÆRNØ, S. H.; STOLTE, J. Effects of soil physical data sources on discharge and soil loss simulated by the LISEM model. **Catena**, v. 97, p. 137-149, 2012.

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

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: ESALW-USP, 2005.

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.

LOPES, S.; CARDOSO, C.; PAULO, A. CLASSIFICAÇÃO E CUSTOS DE ESTRADAS EM FLORESTAS PLANTADAS. **Revista Árvore**, v. 26, n. 3, p. 329-338, 2002.

LUCE, C. H. Effectiveness of Road Ripping in Restoring Infiltration Capacity of Forest Roads. **Restoration Ecology**, v. 5, n. 3, p. 265-270, 1997.

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.

LUCE, C. H.; BLACK, T. A. Sediment production from forest roads in western Oregon. **Water Resources Research**, v. 35, n. 8, p. 2561-2570, 1999.

LUCE, C. H.; CUNDY, T. W. Parameter identification for a runoff model for forest roads. **Water Resources Research**, p. 1057-1069, 1994.

MACDONALD, L. H.; SAMPSON, R. W.; ANDERSON, D. M. Runoff and road erosion at the plot and road segment scales , St John , US Virgin Islands. **Earth Surface Processes and Landforms** v. 272, p. 251-272, 2001.

MACHADO, C. C.; GARCIA, A. R.; SILVA, E.; FONTES, A. M. comparação de taxas de erosão em estradas florestais estimadas pelo modelo WEPP (water erosion prediction project) modificado em relação a medições experimentais. **Revista Árvore**, v. 27, p. 295-300, 2003.

MADEJ, M. A. Erosion and sediment delivery following removal of forest roads. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 26, n. 2, p. 175-190, 2001.

MEGAHAN, W. F.; WILSON, M.; MONSEN, S. B. Sediment production from granitic cutslopes on forest roads in Idaho, USA. **Earth surface processes and landforms**, v. 26, p. 153-163, 2001.

MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling & Software**, v. 18, n. 8-9, p. 761-799, 2003.

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.; WALLING, D. E.; MERTEN, G. H. Combining sediment source tracing techniques with traditional monitoring to assess the impact of improved land management on catchment sediment yields. **Journal of Hydrology**, v. 348, n. 3-4, p. 546-563, 2008.

MONTGOMERY, D. R. Road surface grainage, channel initiation, and slope instability.pdf. **Water Resources Research**, v. 30, n. 6, p. 1925-1932, 1994.

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

NIKKAMI, D. Investigating sampling accuracy to estimate sediment. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 36, p. 583-590, 2012.

PITLICK, J, WILCOCK, P. Relations between streamflow, sediment transport, and aquatic habitat in regulated rivers. **Geomorphic processes and riverine habitat.**, 185-198, 2001.

POLITANO, W.; LOPES, L. R.; AMARAL, C. **O papel das estradas na economia rural.** São Paulo: Nobel, 1989.

PRASAD, A.; TARBOTON, D. G.; LUCE, C. H.; BLACK, T. A. A GIS Tool to Analyze Forest Road Sediment Production and Stream Impacts. **ESRI Users Conference**, 2005

RAMOS SCHARRÓN, C. E. Sediment production from unpaved roads in a sub-tropical dry setting — Southwestern Puerto Rico. **Catena**, v. 82, n. 3, p. 146-158, 2010.

RAMOS-SCHARRÓN, CARLOS E.; MACDONALD, L. H. Measurement and prediction of natural and anthropogenic sediment sources, St. John, U.S. Virgin Islands. **Catena**, v. 71, n. 2, p. 250-266, 2007.

RAMOS-SCHARRÓN, C. E; MACDONALD, L. H. Runoff and suspended sediment yields from an unpaved road segment , St John , US Virgin Islands. **Hydrological Processes**, v. 50, n., p. 35-50, 2007.

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

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

REID, L. M.; DUNNE, T. Sediment production from forest roads surfaces. **Water Resources Research**, v. 20, n. 11, p. 1753-1761, 1984.

ROBICHAUD, P. R.; BROWN, R. E. **Silt Fences : An Economical Technique for Measuring Hillslope Soil Erosion.** . [S.l: s.n.]. , 2002

ROO, A. P. J. DE; 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.

SANT'ANNA, C.L; MELLO, J.M.de; MELLO, O.M.T de. **Estradas Florestais.** 1. ed. Lavras: Editora UFLA, 2000.

SANTOS, I. . **Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica.**2009. (Tese de Doutorado)

SCHULTZ, G. B.; SANTOS, I. Efeito da inclusão de estradas não pavimentadas na simulação hidrossedimentológica com o modelo SWAT. **X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**, 2012a.

SCHULTZ, G.B.; MARANGON, F.H.S.; IENSEN, I.R.R.; SANTOS, I. Simulação da conectividade com os rios e vertentes dos sedimentos provenientes de estradas não pavimentadas. In: **IX Simpósio Nacional de Geomorfologia – IX SINAGEO**, Rio de Janeiro , 2012b.

SCS. **National Engineering Handbook - Sedimentation**. [S.l: s.n.], 1971. p. 226

SHERIDAN, G. J.; NOSKE, P. J.; WHIPP, R. K.; WIJESINGHE, N. The effect of truck traffic and road water content on sediment delivery from unpaved forest roads. **Hydrological Processes**, v. 20, n. 8, p. 1683-1699, 2006.

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

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.

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

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.

SURFLEET, C. G; SKAUGSET III, A. E; MEADOWS, M. W. Road runoff and sediment sampling for determining road sediment yield at the watershed scale. **Canadian Journal of Forest Research**, 41(10), p.1970-1980, 2011.

SWIFT, L. W. Soil Losses from roadbeds and cut and fill slopes in the Southern Appalachians Mountains. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 8, n. November, 1984.

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

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.

VANONI, V. A. **Sedimentation Engineering**. [S.l.]: Manuals & Reports on Engineering Practice, n.54, 1975.

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

WALTRICK, P. C. **Erosividade de chuvas no paran: atualizaao, influencia do “el nino” e “la nia” e estimativa para cenarios climaticos futuros**. 2010. (Dissertaao de Mestrado)

WEMPLE, B. C.; SWANSON, F. J.; JONES, J. A. Forest roads and geomorphic process interactions, Cascade Range, Oregon. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 26, n. 2, p. 191-204, 2001.

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

Wischmeier, W.H.. **A rainfall-erosion index for a Universal Soil Loss Equation**. Soil Sci. Am. Proc., 23, p. 246—249, 1959.

WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses – A guide to conservation planning**. Washington, USDA, 1978. 58p. (USDA AH-537)

YIN, S.; XIE, Y.; NEARING, M. A.; WANG, C. Estimation of rainfall erosivity using 5- to 60-minute fixed-interval rainfall data from China. **Catena**, v. 70, p. 306-312, 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.

ZIEGLER, A. D.; GIAMBELLUCA, T. W.; SUTHERLAND, R. A. Erosion prediction on unpaved mountain roads in northern Thailand: validation of dynamic erodibility modelling using KINEROS2. **Hydrological Sciences** v. 358, p. 337-358, 2001b.

ZIEGLER, A. D.; SUTHERLAND, R. A.; GIAMBELLUCA, T. W. Runoff generation and sediment production on unpaved roads, footpaths and agricultural land surfaces in northern Thailand. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 25, n. 5, p. 519-534, 2000.

ZIEGLER, A. D.; SUTHERLAND, R. A.; GIAMBELLUCA, T. W. Interstorm surface preparation and sediment detachment by vehicle traffic on unpaved. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 26, p. 235-250, 2001a.