

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

WILSON PIMENTA DA SILVA D'ÁVILA

AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM ESTRADAS NÃO
PAVIMENTADAS COM DIFERENTES NÍVEIS DE USO

VITÓRIA
2013

WILSON PIMENTA DA SILVA D'ÁVILA

AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM ESTRADAS NÃO
PAVIMENTADAS COM DIFERENTES NÍVEIS DE USO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na área de concentração de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Rigo.

VITÓRIA
2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

D259a D'Ávila, Wilson Pimenta da Silva, 1975-
Avaliação da produção de sedimentos em estradas não
pavimentadas com diferentes níveis de uso / Wilson Pimenta da
Silva D'Ávila. – 2013.
106 f. : il.

Orientador: Daniel Rigo.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Estradas - Manutenção e reparos. 2. Escoamento. 3.
Solos - Erosão. I. Rigo, Daniel. II. Universidade Federal do
Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 628



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

**“Avaliação da produção de sedimentos em estradas não
pavimentadas com diferentes níveis de uso”**

WILSON PIMENTA DA SILVA D'ÁVILA

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Daniel Rigo
Orientador – DEA/CT/UFES

Prof. Dr. Edmilson Costa Teixeira
Examinador Interno – DEA/CT/UFES

Prof. Dr. Nori Paulo Griebeler
Examinador Externo – UFG

Coordenadora do PPGEA: Profa. Dra. Regina de Pinho Keller
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
Vitória, ES, 26 de agosto de 2013.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Daniel Rigo, pela orientação, apoio e motivação em cada uma das etapas, em especial pela confiança.

À Cristiane Pimenta, companheira de campanha, por todos os momentos, por também acreditar que daria certo, pela alegria.

Aos amigos Geraldo e Fábio, vigilantes da chuva, pelo trabalho realizado com cuidado, pelos ensinamentos.

Ao Sr. Geraldino Zanotti e família, por permitir a realização da pesquisa em sua propriedade e fornecer abrigo em todos os momentos.

Ao companheiro Antonio Carlos. Mesmo tão atarefado, sempre disposto a analisar mais uma amostra.

Aos amigos do Laboratório de Hidráulica e Monitoramento Ambiental, pelo auxílio e pela oportunidade de aprender.

À Banca Examinadora, pelos apontamentos necessários ao aprimoramento, pela contribuição na minha formação.

A Deus, pelos erros e acertos, principalmente pela oportunidade de receber apoio de tantas pessoas que, cada um ao seu modo, consideraram importante avaliar a produção de sedimentos em estradas não pavimentadas.

RESUMO

A avaliação da produção de sedimentos em estradas não pavimentadas é de grande importância, visto que estas são apontadas como grandes fontes de sedimentos, apesar de serem pouco monitoradas no Brasil. Estudos têm apontado que as manutenções das estradas disponibilizam muitas partículas, que são transportadas pelo escoamento superficial. Para quantificar a produção de sedimentos em estradas não pavimentadas é necessário utilizar técnicas de monitoramento que avaliam separadamente partículas grosseiras e partículas finas. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a produção de sedimentos em estradas não pavimentadas com diferentes níveis de uso e contribuir para o melhor entendimento do efeito da manutenção das estradas na produção de sedimentos, bem como testar uma técnica de monitoramento para quantificar separadamente as partículas grosseiras e finas. Foram utilizados equipamentos compostos por um tanque de retenção de sedimentos grosseiros, acoplado a duas câmaras basculantes para quantificação da vazão, além de empregar uma estratégia para amostrar os sedimentos suspensos. Os equipamentos foram instalados em dois trechos de estradas localizados no município de Santa Teresa – ES, onde o monitoramento foi realizado no período de 15/09/12 a 15/03/13, tendo sido registrados 25 eventos de chuva. Os dois trechos monitorados, um com maior uso e outro com menor uso, produziram em média $93,3 \text{ g m}^{-2}$ e $9,7 \text{ g m}^{-2}$, respectivamente, dos quais 68% e 32% corresponderam à carga de sedimentos suspensos, no trecho de maior e de menor uso, respectivamente. A produção de sedimentos apresentou correlação significativa com a erosividade da chuva, com o volume e com a vazão de escoamento superficial nos dois trechos monitorados e foi estimada em $4,59 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ e $0,36 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, nos trechos de maior e de menor uso, respectivamente. O trecho de maior uso apresentou maiores vazões e volumes de escoamento superficial e, diante da grande quantidade de partículas disponibilizadas pela manutenção da estrada, apresentou uma produção de sedimentos quase 10 vezes superior à do trecho de menor uso. A técnica de monitoramento utilizada foi considerada adequada para quantificar separadamente partículas grosseiras e finas.

Palavras-chave: Manutenção de estradas. Escoamento superficial. Erosividade da chuva.

ABSTRACT

Assessing sediment yield in unpaved roads is extremely important because they are considered significant sources of sediment, even though they are not much monitored in Brazil. Studies have shown that road maintenance provides several particles that are transported through surface runoff. In order to quantify sediment yield in unpaved roads, it is necessary to adopt monitoring techniques that assess coarse and fine particles separately. This study aims at assessing sediment yield in unpaved roads with different levels of use, in order to contribute to better understand the effects of road maintenance in sediment yield, as well as testing a monitoring technique to quantify coarse and fine particles separately. The equipment adopted was a retention tank for coarse sediments, attached to two tilting chambers to quantify flow rate; and a strategy to sample suspended sediments. The device was assembled at two sections of roads located in the municipality of Santa Teresa, ES, Brazil, where monitoring was carried out between Sept. 15, 2012 and March 15, 2013. Twenty-five (25) rainfall events were recorded in this period. The two sections monitored, one more and the other less frequently used, yielded on average 93.3 g m^{-2} and 9.7 g m^{-2} , respectively. Of these, 68% and 32% corresponded to the load of suspended sediments, in the section that was more and the one that was less used, respectively. Sediment yield showed significant correlation with rainfall erosivity, volume and surface runoff flow in both sections monitored. Also, it was estimated at $4.59 \text{ kg m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ and $0.36 \text{ kg m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ in the sections more and less frequently used, respectively. The section that was most frequently used showed higher flow rate and surface runoff volume. Because of the large amounts of particles available as a result of road maintenance, it showed sediment yield almost ten times higher than the less frequently used road section. The monitoring technique adopted was considered to be adequate to quantify coarse and fine particles separately.

Keywords: Road maintenance. Surface runoff. Rainfall erosivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–Regiões homogêneas, em termos de características da chuva.....	19
Figura 2	–Erosividade da chuva na bacia do rio Santa Maria do Doce e Santa Joana.....	20
Figura 3	–Drenagem do escoamento superficial em estradas.....	27
Figura 4	–Captação do escoamento superficial por bueiros e trilhas.....	28
Figura 5	–Retenção de sedimentos em tanques.....	31
Figura 6	–Retenção de sedimentos em sequência de tanques.....	32
Figura 7	–Retenção de sedimentos em filtros de tecido.....	32
Figura 8	–Avaliação da produção de sedimentos em sub-parcelas.....	33
Figura 9	–Medidor de fluxo/Amostrador de sedimentos em suspensão.....	33
Figura 10	–Amostragem com calhas e amostradores automáticos.....	34
Figura 11	–Amostrador de enxurrada tipo Coshocton.....	34
Figura 12	–Precipitação média mensal na Região Baixa de Santa Teresa – ES.....	42
Figura 13	–Localização da bacia do rio Perdido.....	43
Figura 14	–Trechos de estradas monitorados – maior (a) e menor uso (b).....	44
Figura 15	–Seção do trecho de maior uso com drenagem para dentro da estrada.....	45
Figura 16	–Perfil longitudinal dos trechos de estradas monitorados.....	45
Figura 17	–Câmaras do medidor de fluxo.....	49
Figura 18	–Data logger e tubo coletor de amostra composta.....	50
Figura 19	–Figura 19 – Calibração dos medidores de fluxo.....	50
Figura 20	–Curvas de calibração vazão x tombamentos por minuto dos medidores P1(a) e P2 (b).....	51
Figura 21	–Curvas de calibração volume x vazão dos medidores P1 (a) e P2 (b).....	51
Figura 22	–Valetas de proteção acima dos taludes no trecho de menor uso.....	53
Figura 23	–Tubos de PVC para captação do escoamento no trecho de maior uso.....	53
Figura 24	–Limpeza das tubulações com esponjas.....	54
Figura 25	–Medidor de fluxo P2.....	54
Figura 26	–Coleta de sedimentos grosseiros retidos no tambor.....	55
Figura 27	–Homogeneização de amostras.....	56
Figura 28	–Pontos de inflexão para determinação da erosividade da chuva - evento 13.....	57
Figura 29	–Curva de Oden para o evento 7 no trecho de menor uso.....	59
Figura 30	–Erosividade e intensidade da chuva.....	62
Figura 31	–Medidor de fluxo em funcionamento.....	63
Figura 32	–Vazões registradas durante o evento 17.....	64
Figura 33	–Vazões registradas durante o evento 19.....	64

Figura 34 – Coeficiente de escoamento por evento de chuva.....	64
Figura 35 – Escoamento superficial por evento de chuva.....	65
Figura 36 – Trecho de maior uso antes e após a manutenção.....	67
Figura 37 – Relação entre Q30 e I30.....	68
Figura 38 – Relação entre escoamento superficial e Q30.....	68
Figura 39 – Relação entre coeficiente de escoamento e I30.....	69
Figura 40 – Relação entre coeficiente de escoamento e Q30.....	69
Figura 41 – Relação entre a razão dos coeficientes de escoamentos e I30.....	69
Figura 42 – Relação entre os escoamentos gerados nos trechos monitorados.....	71
Figura 43 – Relação entre as vazões (Q30) produzidas nos trechos monitorados.....	71
Figura 44 – Relação entre escoamento superficial e total precipitado.....	71
Figura 45 – Relação entre escoamento superficial e total precipitado – ajustado.....	72
Figura 46 – Produção de sedimentos no trechos monitorados.....	73
Figura 47 – Relação entre produção de sedimentos e erosividade da chuva.....	75
Figura 48 – Relação entre produção de sedimentos e total precipitado.....	75
Figura 49 – Relação entre produção de sedimentos e total precipitado – ajustado.....	76
Figura 50 – Vazão de escoamento superficial (Q30) por evento de chuva.....	78
Figura 51 – Vazão de escoamento superficial (Q _{máx}) por evento de chuva.....	78
Figura 52 – Relação entre produção de sedimentos e Q30.....	79
Figura 53 – Relação entre produção de sedimentos e escoamento superficial.....	79
Figura 54 – Crescimento da vegetação – trechos de menor e maior uso, respectivamente..	80
Figura 55 – Concentração de fluxos e abertura de sulcos.....	82
Figura 56 – Percentual de sedimentos em suspensão por evento de chuva.....	83
Figura 57 – Percentual de sedimentos grosseiros por evento de chuva.....	83
Figura 58 – Relação entre produção de sedimentos grosseiros e suspensos com EI30.....	84
Figura 59 – Relação entre produção de sedimentos grosseiros e suspensos com Q30.....	84
Figura 60 – Granulometria dos materiais superficiais dos trechos monitorados.....	85
Figura 61 – Sedimentos retidos no tambor após secagem em estufa.....	86
Figura 62 – Relação entre concentração de sedimentos com Q30 e com EI30.....	86
Figura 63 – Modificações na textura das partículas em suspensão com aumento de EI30...	87
Figura 64 – Relação entre o D50 das partículas transportadas com EI30 e Q30.....	88
Figura 65 – Materiais lançados sobre o trecho de maior uso na atividade de manutenção...	88
Figura 66 – Trecho de maior uso no início, durante e ao fim do monitoramento.....	89
Figura 67 – Relação entre produção de sedimentos e EI30 acumulados – Trecho de maior uso.....	91

Figura 68 –Relação entre produção de sedimentos e EI30 acumulados - Trecho de menor uso.....	91
Figura 69 –Estimativa da produção mensal de sedimentos para os trechos monitorados....	91
Figura 70 –Valas de proteção, valetas de captação de fluxo e alteração no tubo coletor.....	93
Figura 71 –Amostras de escoamento superficial.....	93

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Classificação textural das partículas.....	21
TABELA 2 – Valores críticos para o coeficiente de correlação.....	41
TABELA 3 – Precipitação mensal.....	60
TABELA 4 – Precipitação e escoamento superficial por evento de chuva.....	61
TABELA 5 – Produção de sedimentos nos trechos de estradas monitorados.....	74

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 Geral.....	14
2.2 Específicos.....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Erosão.....	15
3.1.1 Formação e erosão do solo.....	15
3.1.2. Fatores que interferem na erosão do solo.....	17
3.1.2.1 Precipitação.....	17
3.1.2.2 Propriedades do solo.....	21
3.1.2.3 Características topográficas.....	22
3.1.2.3 Uso e manejo do solo.....	23
3.1.3 Infiltração, escoamento superficial e transporte de partículas.....	24
3.2 Estradas não pavimentadas.....	26
3.2.1 Construção, características geométricas e hidrológicas.....	26
3.2.2 Erosão em estradas não pavimentadas.....	29
3.2.3 Monitoramento da produção de sedimentos em estradas não pavimentadas.....	31
3.2.3.1 Técnicas de monitoramento.....	31
3.2.3.2 Coleta de sedimentos e análises de laboratório.....	36
3.2.3.3 Avaliação da produção de sedimentos em estradas não pavimentadas.....	38
3.3 Correlação entre variáveis.....	41
4. METODOLOGIA	42
4.1 Local de estudo e escolha dos trechos de estradas monitorados.....	42
4.2 Monitoramento e coleta de sedimentos.....	46
4.3 Projeto, construção e calibração dos medidores de fluxo.....	48
4.4 instalação de equipamentos, coleta e processamento de amostras.....	52
4.5 Análise e tratamento de dados.....	56
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
5.1 Precipitação e escoamento superficial.....	60
5.2. Produção de sedimentos.....	73
5.3 Avaliação da técnica de monitoramento e comparação de resultados.....	92
6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES DE ESTUDOS FUTUROS	97
7. REFERÊNCIAS	100

1. INTRODUÇÃO

As estradas não pavimentadas são de grande importância para a economia de um país, pois além de possibilitar o escoamento da produção agrícola até os centros consumidores, permitem acesso aos serviços de saúde e educação, dentre outros, considerados essenciais para a sociedade (GRIEBELER; PRUSKI; SILVA, 2009; MARCELINO, 2007; OLIVEIRA *et al.*, 2009). Todavia, apesar da importância, as estradas não pavimentadas provocam impactos no meio ambiente, pois atuam como grandes fontes de sedimentos (MACDONALD *et al.*, 2001; SHERIDAN *et al.*, 2006).

Os sedimentos podem produzir vários problemas, dentre estes a degradação da qualidade da água, elevação dos custos de tratamento, perturbação na forma dos corpos hídricos e prejuízos à navegação (CARVALHO, 2008). Quando em suspensão, os sedimentos constituem um dos principais poluentes aquáticos, uma vez que, ao aumentar a turbidez, podem reduzir a produtividade primária, dificultar a procura por alimento e interferir na cadeia alimentar (BRAGA *et al.*, 2005; WOOD; ARMITAGE, 1997).

Os processos de construção e manutenção de estradas não pavimentadas, por exemplo, envolvem a realização de cortes no terreno que desprotegem, desagregam o solo e provocam a exposição de camadas menos estáveis (GRIEBELER; PRUSKI; SILVA, 2009). Além disso, a compactação da pista de rolamento, necessária para garantir uma boa condição de tráfego, interfere na infiltração da água no solo, contribuindo para a concentração do escoamento superficial e favorecendo a ocorrência da erosão hídrica (MARCELINO, 2007).

Vários fatores fazem com que as estradas não pavimentadas apresentem uma maior produção de sedimentos, dentre estes, o tráfego de veículos, que provoca a trituração dos materiais superficiais, e as manutenções, realizadas para garantir melhores condições ao deslocamento dos veículos (SUGDEN; WOODS, 2007). Estes dois processos liberam grande quantidade de sedimentos finos, transportados em suspensão que, caso não sejam devidamente quantificados, subestimam a produção de sedimentos na parcela experimental (SHERIDAN *et al.*, 2006).

No Brasil, pesquisas vêm sendo realizadas para compreender e quantificar a perda de solos em estradas não pavimentadas, mas ainda são pouco expressivas quando comparadas aos demais estudos de perda de solos em áreas agrícolas (OLIVEIRA *et al.*, 2009). Tendo em vista os impactos que os sedimentos provocam no meio ambiente, a contribuição das estradas nesse processo, bem como a importância econômica e social que estas detêm, mais pesquisas precisam ser desenvolvidas. Nesta perspectiva, busca-se ampliar a compreensão dos processos erosivos em estradas não pavimentadas e gerar informações sobre a produção de sedimentos.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral:

Avaliar a produção de sedimentos em estradas não pavimentadas com diferentes níveis de uso e contribuir para o melhor entendimento do efeito da manutenção das estradas na produção de sedimentos.

2.2 Específicos:

- Quantificar e comparar a produção de sedimentos em dois trechos de estradas não pavimentadas, um destes localizado em uma estrada de maior uso e submetida à manutenção da pista de rolamento e o outro localizado em uma estrada de menor uso, não submetida à manutenção;
- Avaliar separadamente a produção de partículas grosseiras e finas transportadas pelo escoamento superficial em cada um dos trechos monitorados.
- Verificar a relação entre a produção de sedimentos e as variáveis relacionadas à precipitação e ao escoamento superficial.
- Testar uma técnica de monitoramento para quantificar separadamente as partículas grosseiras e finas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Erosão

3.1.1 Formação e erosão do solo

Vários agentes atuam sobre os materiais existentes na superfície terrestre (rochas) através de processos físicos e químicos, chamados de intemperismo, que promovem a desagregação e a decomposição destes materiais superficiais (TOLEDO; OLIVEIRA; MELFI, 2001). Frequentemente, estes materiais desagregados, conhecidos como sedimentos, podem ser transportados pela água para além dos seus locais de origem (CARVALHO, 2008).

Os sedimentos, além das alterações químicas e mineralógicas, passam por modificações estruturais que envolvem deslocamentos e redistribuição dos minerais, através de um processo chamado de pedogênese, dando origem aos solos (TOLEDO; OLIVEIRA; MELFI, 2001). Assim, os solos são constituídos por materiais rochosos em diferentes estágios de decomposição, água, ar, organismos vivos, matéria orgânica e substâncias químicas (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008).

Desse modo, intemperismo e pedogênese formam perfis de alteração ou perfis de solo com características distintas tais como espessura, composição química, textura, dentre outros (TOLEDO; OLIVEIRA; MELFI, 2001), gerando diferentes tipos de solos. Solos formados ou em formação sofrem processos erosivos, ou simplesmente erosão, um processo natural frequentemente observado, caracterizado pelo desprendimento, transporte e deposição das partículas do solo (PRUSKI, 2009a).

Provocada por vários agentes – água, vento, etc. – a erosão é controlada por diversos fatores, tais como, a morfometria das vertentes, o comportamento dos solos, a precipitação e o uso da terra (SIMÕES; COIADO, 2001). Em condições naturais, a velocidade de formação do solo se equilibra às taxas de erosão, no entanto, as ações antrópicas têm intensificado os processos erosivos enquanto a pedogênese continua a ocorrer em ritmo lento (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008).

As águas das chuvas, ao caírem sobre o solo, iniciam a erosão hídrica, pois através do impacto das gotas sobre terreno ocorrem as primeiras desagregações e transporte de partículas, chamado salpicamento (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008). O impacto destas gotas, devido à sua energia cinética, produz ainda um selamento superficial ao promover o fechamento dos poros, além disso, as águas das chuvas diminuem as forças coesivas dos agregados do solo permitindo o desmembramento deste em partículas menores (PRUSKI, 2009a).

O desprendimento das partículas do solo também é proporcionado pelo escoamento superficial, principal agente de transporte, uma vez que este é capaz de produzir uma tensão cisalhante com potencial para romper a ligação entre os agregados do solo e transportá-las dentro do próprio escoamento (PRUSKI, 2009a). Partículas em fluxo conferem ao escoamento características abrasivas, pois se chocam com outras, promovem a desagregação e as colocam em movimento (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008).

Essa capacidade de desagregação produzida pelo escoamento superficial é aumentada pelo impacto das gotas de chuva sobre o fluxo e pela concentração deste nas depressões, pois estas duas situações produzem o aumento da turbulência no escoamento (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008). Fluxo laminar formando uma fina camada líquida ao longo da superfície, ou concentrado, em canais existentes na superfície do terreno, produzem, respectivamente, a erosão laminar e a erosão em sulcos (SIMÕES; COIADO, 2001).

A erosão laminar - caracterizada pela lavagem da superfície do terreno – não é facilmente percebida e, de fato, a lâmina de água não é uniforme, pois a superfície do solo não apresenta rugosidade e inclinação constante ao longo de toda a topografia. Assim, associada à erosão laminar, ocorre a erosão em sulcos ou concentrada, produzida onde as partículas de solo oferecem menor resistência ao escoamento, cuja velocidade aumenta a medida que ocorrem acréscimos no volume escoado e na declividade do terreno (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008).

Pequenos sulcos provenientes da erosão concentrada podem evoluir dando origem às voçorocas, que são as formas mais graves da erosão em sulcos (SIMÕES; COIADO, 2001). Regra geral, as voçorocas são produzidas quando grandes volumes de enxurrada, que escoam frequentemente em um mesmo sulco, deslocam grandes quantidades de solos e os transformam em valas extensas e profundas, de grande instabilidade e de difícil controle (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008).

Porém, a quantidade de partículas transportadas durante o escoamento é dependente da taxa de entrada destas no fluxo e da taxa de deposição apresentada por este, representando um balanço chamado de capacidade de transporte (OLIVEIRA *et al.*, 2005). Assim, a deposição do material contido no fluxo irá ocorrer quando a quantidade de partículas transportadas exceder a capacidade de transporte do escoamento superficial (PRUSKI, 2009a).

3.1.2. Fatores que interferem na erosão do solo

3.1.2.1 Precipitação

As chuvas são os agentes naturais que fornecem a energia necessária ao processo de erosão hídrica (PRUSKI, 2009b). Para ocorrerem, é necessário que a água presente na atmosfera, na forma de vapor, se condense e forme gotículas que, para caírem, precisam ter um peso superior às forças que as mantêm em suspensão; ao caírem, a velocidade de queda deve vencer as forças ascendentes produzidas pela atmosfera, caso contrário, permaneceriam em suspensão (BERTONI; TUCCI, 2001).

Registros de precipitação são muito importantes para compreensão de inúmeros processos, dentre estes os processos erosivos. A medida mais utilizada é a altura pluviométrica, dada em milímetros, definida como a espessura média da lâmina d'água precipitada sobre um metro quadrado de superfície, tomando como inexistentes perdas por evaporação, infiltração ou perdas para fora dos limites definidos (BERTONI; TUCCI, 2001; SANTOS *et al.*, 2001). Comumente as medições são realizadas através de pluviômetros ou pluviógrafos.

Pluviômetros são aparelhos que acumulam o total de chuva que incide em seu interior, enquanto os pluviógrafos são aparelhos que medem e registram continuamente, a precipitação (SANTOS *et al.*, 2001). O tempo de retorno (Tr), obtido através de um tratamento estatístico de dados fornecidos por séries históricas é interpretado como o número médio de anos em que uma dada precipitação é igualada ou superada, o seu inverso ($1/Tr$) constitui a probabilidade (P) do valor analisado ser igualado ou superado (BERTONI; TUCCI, 2001).

A intensidade de precipitação é a quantidade de chuva ocorrida num dado intervalo de tempo ($mm\ h^{-1}$), quanto mais fracas e prolongadas, ou seja, quanto menor intensidade da chuva, mais favorecida será a infiltração e, por conseguinte, a alimentação do lençol freático, produzindo menores taxas de escoamento superficial e erosão do solo (SIMÕES; COIADO, 2001). Correlações realizadas entre intensidade (i), duração (d) e frequência (f) indicam que a intensidade de precipitação e a duração se relacionam de modo inverso (BERTONI; TUCCI, 2001).

Em conjunto, a intensidade, a duração e a frequência das precipitações estão muito relacionadas à capacidade da precipitação provocar erosão (PRUSKI, 2009b). A relação entre as três variáveis, associadas a certo período de retorno (Tr), são conhecidas como equações de intensidade duração e frequência e podem ser obtidas a partir de dados tomados em um período de observação longo e representativo para certa localidade (BERTONI; TUCCI, 2001).

O índice de erosão (EI_{30}), também conhecido como erosividade da chuva, é considerado a melhor relação encontrada para medir o potencial erosivo da chuva e é constituído pelo produto da energia cinética da chuva (E_c) pela intensidade da precipitação (Equação 1). Longos estudos demonstraram que a produção de sedimentos é diretamente proporcional ao produto da energia cinética da chuva pela sua intensidade máxima em 30 minutos (I_{30}) quando todos outros fatores são mantidos constantes (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008). Essa relação entre intensidade de precipitação e produção de sedimentos também tem sido verificada em estradas não pavimentadas (RAMOS-SCHARRÓN; MACDONALD, 2005).

Para o cálculo da energia cinética total de uma chuva é necessário subdividi-la em seguimentos – intervalos de intensidade constante - e realizar o somatório da energia de cada um destes. Identificada a intensidade da chuva em cada um dos intervalos, é preciso aplicar a Equação 2 a cada um destes seguimentos e multiplicar o resultado pela altura da lâmina d'água precipitada dentro deste intervalo avaliado; o somatório da energia calculada para cada um dos seguimentos constitui a energia total do evento de chuva (WICHMEIER; SMITH, 1978).

$$EI_{30} = E_c I_{30} \quad (1)$$

$$E_c = 0,119 + 0,0873 \log I \quad (2)$$

Em que:

EI_{30} = índice de erosão ($MJ ha^{-1} mm h^{-1}$).

I = intensidade da chuva ($mm h^{-1}$).

E_c = energia cinética em ($MJ ha^{-1} mm$).

O EI_{30} , para um dado local, corresponde a média dos valores anuais de erosividade, regra geral, vinte anos ou mais (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008). No Brasil, segundo Silva *et al.* (2010), vários trabalhos têm sido produzidos com vistas a determinar os índices de erosividade. Nesse sentido, Silva (2004), citado por PRUSKI (2009b, p. 42), realizou estudos sobre os índices de erosividade e reuniu equações propostas por vários autores para estimar a erosividade da chuva mensal, através da precipitação média mensal e anual (Figura 1).



Figura 1 - Regiões homogêneas, em termos de características da chuva.
Fonte: Silva (2004) citado por Pruski (2009b).

Abaixo, são apresentadas as equações propostas para as regiões 4, 5 e 6.

EQUAÇÃO	AUTOR	REGIÃO	
$R_x = 42,307 \left(\frac{M_x^2}{P} \right) + 69,763$	Silva (2001)	4	(3)
$R_x = 0,13(M_x^{1,24})$	Leprun (1981)	5	(4)
$R_x = 12,592 \left(\frac{M_x}{P} \right)^{0,6030}$	Val <i>et al.</i> (1986)	6	(5)

Em que,

R_x = Erosividade da chuva para cada mês ($MJ\ ha^{-1}\ mm\ h^{-1}$).

M_x = Precipitação média mensal (mm).

P = Precipitação média anual (mm).

Nas áreas localizadas próximas dos limites das regiões homogêneas, as equações utilizadas nem sempre têm coincidido com aquelas previamente indicadas para uma região. DALLA (2011), por exemplo, ao estimar a produção de sedimentos para as bacias do rio Santa Maria do rio Doce (SM) e do rio Santa Joana (SJ) – Figura 2 – localizadas próximas da divisa com o Estado de Minas Gerais, utilizou a Equação 3, proposta para a região 4.

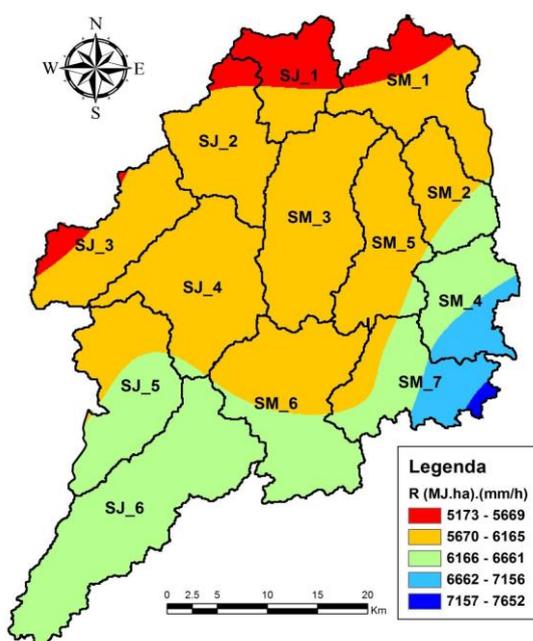


Figura 2 - Erosividade da chuva na bacia do rio Santa Maria do Doce e Santa Joana.
Fonte: Dalla (2011)

3.1.2.2 Propriedades do Solo

Diversos fatores atuam na pedogênese, tais como a rocha matriz, clima, topografia, tempo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008), dentre outros, de modo que solos podem apresentar propriedades muito diferenciadas, tais como, textura, estrutura, permeabilidade, etc. (REZENDE *et al.*, 2007). Neste sentido, a resistência à erosão reflete a combinação de diversas propriedades físicas e químicas intrínsecas a cada tipo de solo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008).

Diferentes tamanhos de partículas podem estar presentes em um solo determinando sua textura (TABELA 1). Esta é uma das propriedades mais intimamente relacionadas com a quantidade de sedimentos produzidos por uma dada parcela de solo; a falta de argilas, por exemplo, atuando como elos de ligação entre partículas maiores, pode favorecer a desagregação do material mesmo quando são gerados pequenos volumes de enxurrada (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008).

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL DAS PARTÍCULAS DE SOLO

Classificação	Diâmetro (mm)
Areia grossa	1,00 a 0,50
Areia média	0,50 a 0,25
Areia fina	0,25 a 0,125
Areia muito fina	0,125 a 0,0625
Silte grosso	0,0625 a 0,031
Silte médio	0,031 a 0,016
Silte fino	0,016 a 0,008
Silte muito fino	0,008 a 0,004
Argila grossa	0,004 a 0,0020

Fonte: Carvalho (2008)

A estrutura do solo é a propriedade que caracteriza a forma como as partículas estão dispostas (REZENDE *et al.*, 2007) e exerce influência sobre importantes características do solo, tais como a facilidade de preparo para cultivo, permeabilidade e resistência a erosão; a porosidade aparece como uma relação entre a proporção dos espaços ocupados por líquidos e gases e o espaço ocupado pela massa de solo; pode ser definida como a facilidade com que um solo deixa a água fluir em seu interior (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008).

Desse modo, considerando as propriedades exibidas pelos solos, que os diferenciam entre si e diferenciam suas camadas, os vários tipos de solos existentes na superfície terrestre não respondem da mesma forma aos processos erosivos atuantes (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008). Esta resposta diferenciada é conhecida como erodibilidade do solo; uma propriedade intrínseca, relacionada à resistência à tensão cisalhante produzida pela precipitação e pelo escoamento superficial (PRUSKI, 2009b; SIMÕES; COIADO, 2001).

3.1.2.3 Características topográficas

A quantidade de sedimentos desagregados pela ação das águas escoadas sobre a superfície do terreno é grandemente afetada pela forma das vertentes, isso porque o relevo pode espalhar ou concentrar o escoamento superficial, quando este ocorre sobre formas convexas ou côncavas, respectivamente (SIMÕES; COIADO, 2001). Igualmente, a perda de solo está relacionada ao comprimento da rampa e sua inclinação, visto que estes fatores exercem influência sobre a energia cinética do escoamento (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008).

Em estradas não pavimentadas, segundo Ramos-Scharrón e Macdonald (2005) a interação entre comprimento e declividade constitui um dos elementos mais fortemente correlacionados com produção de sedimentos, no entanto, de acordo com Garcia *et al.* (2003), a declividade tem demonstrado uma maior influência sobre a massa de solo produzida. Isso ocorre porque a tensão de cisalhamento é influenciada por vários fatores (Equação 6), dentre estes, a declividade do terreno (PRUSKI; 2009b).

$$\tau = \gamma Q^{3/5} n^{3/5} I^{7/10} \quad (6)$$

Em que:

τ = tensão cisalhante associada ao escoamento (Pa).

γ = peso específico da água que escoar (N m⁻³).

Q = vazão de escoamento superficial (m³ s⁻¹).

n = coeficiente de rugosidade da equação de Manning.

I = declividade da superfície livre da água (m m⁻¹).

3.1.2.3 Uso e manejo do solo

A maior ou menor disponibilização de sedimentos é dependente também das condições de proteção do solo contra a o impacto das gotas de chuva e do escoamento superficial, nesse aspecto, a vegetação exerce importante papel. A cobertura vegetal atua como um amortecedor de impacto, de modo que, quando as gotas de chuva atingem o terreno, já perderam parte da energia capaz produzir a desestruturação do solo e de realizar o selamento da superfície do terreno (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008).

Além disso, a vegetação aumenta a rugosidade do terreno, diminui a velocidade do escoamento superficial e facilita a infiltração. Em terrenos onde a cobertura vegetal foi retirada, alterando o uso do solo, em especial em áreas destinadas à agricultura e à pecuária, existe uma maior suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos. Essa condição torna-se ainda mais agravada nos países tropicais onde foram implantadas técnicas de cultivo adotadas em países de clima temperado, produzindo grandes alterações no ambiente (PRUSKI, 2009b).

Assim, para minimizar as perdas de solos, é muito importante a adoção de práticas conservacionistas capazes de, por exemplo, reduzir a velocidade do escoamento superficial e facilitar a infiltração, tais como a criação de obstáculos aos escoamentos sobre as superfícies mais inclinadas, aumento da cobertura vegetal através de reflorestamentos, plantio de gramas, cobertura do solo com palhas, dentre outros (Braga *et al.*, 2005).

Em estradas não pavimentadas, segundo Griebeler, Pruski e Silva (2009), algumas práticas também podem ser utilizadas com o objetivo de evitar a concentração do escoamento superficial sobre a pista de rolamento, tal como a adoção de bacias de acumulação. Ainda segundo estes autores, é possível que o escoamento superficial seja direcionado para as áreas marginais quando tratam-se de áreas de cultivo, visto que estas áreas oferecem melhores condições de infiltração, quando comparada com o leito das estradas.

3.1.3 Infiltração, escoamento superficial e transporte de partículas

A infiltração, um dos aspectos que mais exerce influência sobre o escoamento superficial, pode ser definida como um processo caracterizado pelo movimento da água através de uma camada de solo (PRUSKI, 2009a). Uma vez que a estrutura e a textura do solo conformam os espaços vazios para serem ocupados pela água, o estado de umidade do solo, nos primeiros momentos da chuva, define quanto destes espaços estão disponíveis para serem preenchidos (CABRAL *et al.*, 2001).

Assim, a capacidade de infiltração da água é definida como a quantidade máxima de água capaz de infiltrar no solo, portanto, dependente da umidade do solo no início da precipitação (CABRAL *et al.*, 2001). No decorrer da precipitação, parte dos espaços vazios existentes no solo vão sendo preenchidos pela água infiltrada, diminuindo a taxa de infiltração ao longo do tempo, até atingir um valor constante conhecido como condutividade hidráulica do solo saturado (PRUSKI, 2009a).

Excedida a capacidade de infiltração da água no solo, quando a intensidade de precipitação excede a taxa de infiltração, a água inicialmente ficará armazenada na superfície do terreno em pequenas irregularidades, mas quando esta capacidade de retenção for excedida, terá início o escoamento superficial (PRUSKI, 2009a). Um dos métodos utilizados para estimar a vazão máxima de escoamento é o método racional, descrito através da equação Equação 7 (PRUSKI, 2009c):

$$Q_{\text{máx}} = \left(\frac{C \text{ Im } A}{360} \right) \quad (7)$$

Em que,

$Q_{\text{máx}}$ = vazão máxima de escoamento superficial ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

C = coeficiente de escoamento superficial (adimensional).

Im = intensidade máxima de precipitação para uma dada duração (mm h^{-1}).

A = área de drenagem (ha).

Os coeficientes de escoamento superficial são obtidos através da relação entre o volume escoado e o volume precipitado e, segundo Azevedo Neto (1998), estes coeficientes dependem de vários fatores, tais como, a topografia e a presença de vegetação. Em estradas não pavimentadas, Ramos-Scharrón e Macdonald (2007) obtiveram coeficientes de 0,03 até 0,72 e, nesse sentido, maiores coeficientes implicam em maiores as perdas de solo, visto que, segundo Garcia *et al.* (2003), maiores volumes transportam maiores quantidades de partículas.

As partículas transportadas podem apresentar diferentes granulometrias e, de um modo geral, partículas maiores que 2mm de diâmetro são grandes demais para serem transportadas em suspensão, portanto tendem a rolar, deslizar e saltar; partículas menores, tais como as areias finas, siltes e argilas – diâmetros inferiores a 0,2mm – são transportadas em suspensão; partículas intermediárias, ou seja, as areias média e grossa – diâmetro entre 0,2mm e 2mm – eventualmente são transportadas em suspensão (GOMI; MOORE; HASSAN, 2005).

Para se manterem em suspensão, as partículas menores que 0,2mm precisam ser suportadas pelas componentes verticais das velocidades enquanto são transportadas pelos fluxos horizontais (CARVALHO, 2008). Estas partículas apresentam baixas velocidades de sedimentação (OLIVEIRA *et al.*, 2005) e tendem a fluir com o escoamento superficial (BLACK; LUCE, 2007); havendo diminuição das forças que as mantêm em suspensão, experimentarão outro tipo de transporte, ou serão depositadas (CARVALHO *et al.*, 2000), primeiramente aquelas com maior textura e por último as menores, que serão depositadas em locais mais distantes (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008).

Ocorrida a deposição, partículas menores que 1mm, mesmo que acomodadas entre os sedimentos grosseiros, podem ser facilmente colocadas em suspensão (WOOD; ARMITAGE, 1997). Partículas maiores também podem ser levantadas e transportadas em suspensão, seja devido a acréscimos no escoamento provocados pelo aumento da precipitação, seja pelo aumento da turbulência provocado pelo impacto da chuva sobre a lâmina d'água (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008).

3.2 Estradas não pavimentadas

3.2.1 Construção, características geométricas e hidrológicas

Estradas não pavimentadas, também conhecidas como estradas vicinais ou estradas de terra são rodovias em que a superfície de rolamento é constituída pelo próprio terreno em que foram locadas e, em muitos casos, nascem a partir de caminhos pré-existentes (DNIT, 2005). Estas estradas interligam propriedades rurais, permitem que as pessoas tenham acesso a serviços localizados em áreas urbanas, contribuem para o estabelecimento de melhores condições de vida no campo (GRIEBELER; PRUSKI; SILVA, 2009).

Em áreas onde operam empresas florestais, estradas de terra são construídas com a finalidade de permitir o manejo da produção, sendo de grande importância para esta atividade (GARCIA *et al.*, 2003). Seja para produção agrícola ou florestal, estradas mal conservadas, com baixas condições de tráfego, contribuem para o aumento dos custos de produção, pois aumentam os custos com escoamento dos produtos e interfere nos rendimentos (GRIEBELER; PRUSKI; SILVA, 2009).

Quando construídas em áreas inclinadas (encostas), os cortes realizados dão origem às pistas de rolamento e aos taludes. Enquanto as pistas constituem as bases para o tráfego de veículos, os taludes constituem as superfícies laterais das estradas, produzidas por corte ou aterro, geralmente inclinadas em relação ao plano vertical (DNER, 1997). Regra geral, a inclinação destas superfícies é definida em função do tipo de solo e altura dos cortes realizados (LUCE; BLACK, 1999).

As pistas de rolamento podem apresentar inclinações para garantir boas condições drenagem, reduzindo a lâmina d'água na pista e, ao mesmo tempo, fornecer maior segurança para o deslocamento dos veículos. Para aumentar a segurança, as pistas podem ser dotadas de uma inclinação ainda maior nas curvas, chamada de superelevação, construída para equilibrar o efeito da força centrífuga atuante sobre os veículos em deslocamento (DNER, 1997).

Assim, a pista de rolamento pode drenar o escoamento superficial de diferentes formas (Figura 3): direcionando o fluxo para a base do talude; direcionando o fluxo para a fora da estrada ou ainda, para os dois lados da pista (MOLL; COPSTEAD; JOHANSEN, 1997). Frequentemente são construídas valetas de pé, instaladas na base dos taludes, um caminho específico para a condução do fluxo superficial (DNER, 1997) e interceptação do fluxo de subsuperfície proveniente dos taludes (JONES *et al.*, 2000).

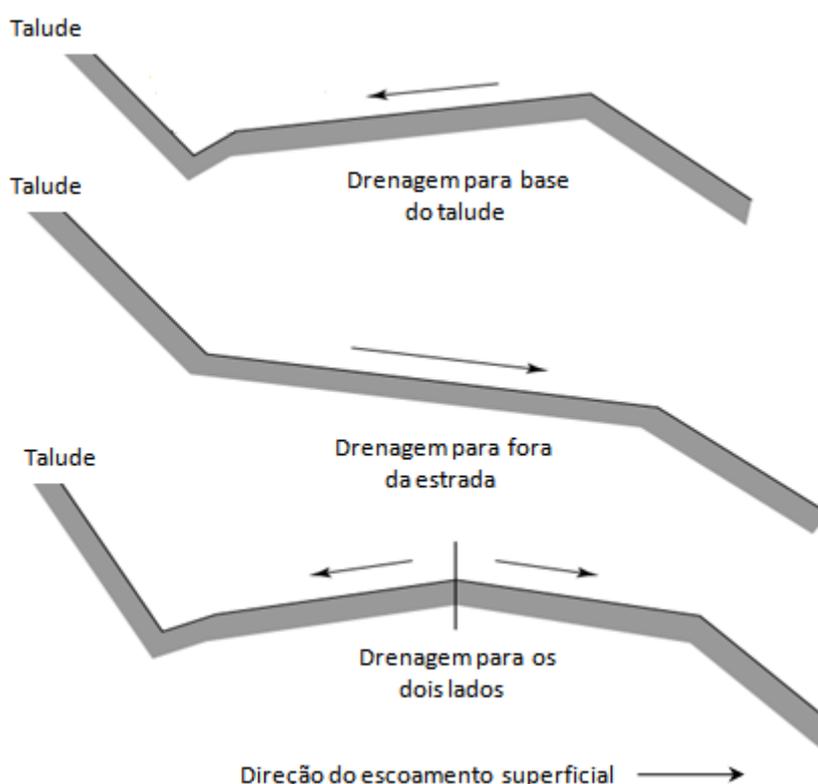


Figura 3 - Drenagem do escoamento superficial em estradas.

Fonte: Adaptado de Moll, Copstead e Johansen (1997).

Valetas de proteção, construídas para interceptar o escoamento superficial proveniente das áreas acima dos taludes, juntamente com valetas de pé, localizadas na base dos taludes, em geral, direcionam seus fluxos para bueiros. Estes são constituídos por tubos destinados a conduzir a água sob a estrada, atravessando-a, no entanto, este escoamento pode ser captado por trilhas, que são deformações produzidas pelos pneus dos veículos (Figura 4) durante os sucessivos deslocamentos sobre a pista de rolamento (DNER, 1997).

Devido à compactação da pista de rolamento, ocorrem alterações na forma com que a água e os sedimentos circulam na paisagem, pois as estradas atuam como obstáculos aos fluxos naturalmente existentes antes de sua construção (LANE; SHERIDAN, 2002). Além disso, estradas promovem alterações nos pontos onde as partículas de solos transportadas são liberadas (JONES *et al.*, 2000; LANE; SHERIDAN, 2002), provocando consequências imediatas ou de longo prazo (OLIVEIRA *et al.*, 2005).

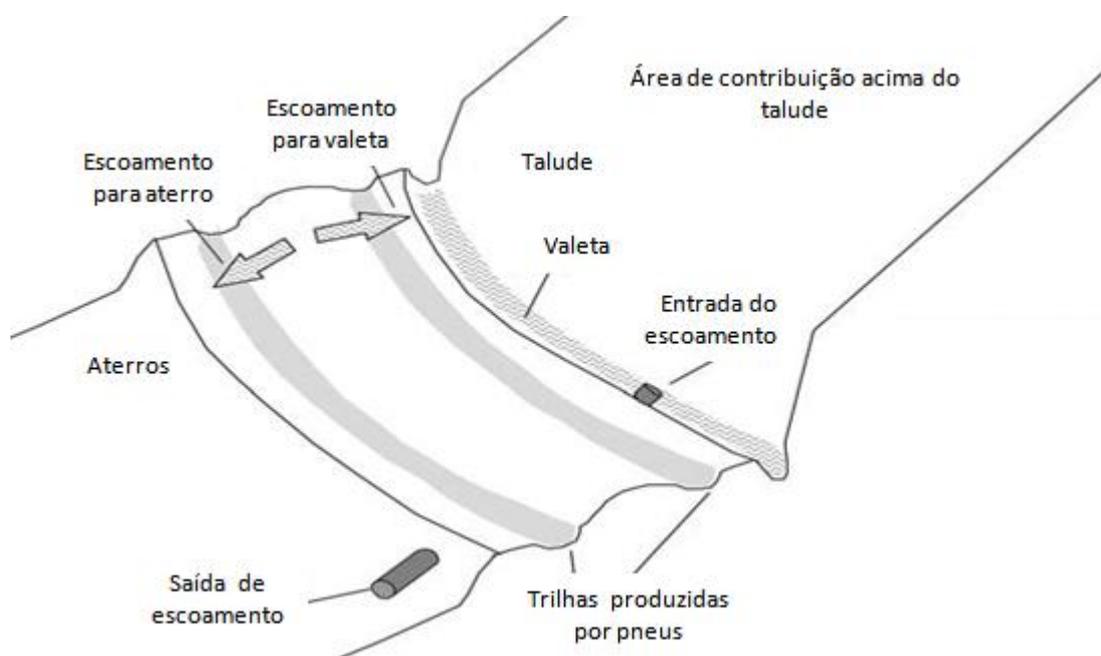


Figura 4 - Captação do escoamento superficial por bueiros e trilhas.

Fonte: Adaptado de Wemple e Jones (2003)

Individualmente, cada trecho de estrada possui uma área de drenagem onde capturam fluxos e formam redes, cujo comportamento hidrológico depende das modificações produzidas no escoamento superficial até atingir o canal fluvial (WEMPLE; JONES, 2003). Em locais onde as estradas não apresentam uma drenagem adequada, o escoamento superficial, os fluxos concentrados promovem facilmente a retirada dos sedimentos mais finos disponibilizados pelas manutenções na pista (RAMOS-SCHARRÓN; MACDONALD, 2005).

3.2.2 Erosão em estradas não pavimentadas

Vários fatores interferem na produção de sedimentos em estradas não pavimentadas, dentre estes, a precipitação, as condições topográficas e a presença de vegetação, no entanto, outros fatores também exercem interferências, tais como: a área ocupada pelos taludes (aterros), o tempo desde a construção ou desde a última manutenção, as condições de drenagem da pista de rolamento, o tráfego de veículos e as manutenções.

Taludes mais elevados tendem a produzir maior quantidade de sedimentos e, caso não sejam submetidos à manutenção, adquirem estabilidade ao longo do tempo diminuindo a produção de sedimentos (FAHEY; COKER, 1989). Enquanto taludes inserem cargas de sedimentos para dentro das estradas, os aterros contribuem para as áreas adjacentes (BURROUGHS; KING, 1989) e, segundo Fahey e Coker (1989), estes podem gerar uma quantidade de sedimentos tão grande quanto àquela gerada pela pista de rolamento, valas de drenagem e taludes em conjunto.

A produção de sedimentos tende a diminuir com passar do tempo, visto que estradas mais antigas apresentam menor disponibilidade de sedimentos quando comparada com estradas mais novas (LUCE; BLACK, 1999). Um dos motivos dessa redução é que os sedimentos finos, mais facilmente transportados pelas enxurradas, deixam a superfície da estrada e ocorre um gradativo engrossamento da textura dos materiais superficiais remanescentes (RAMOS-SACHARRÓN; MACDONALD, 2005). O crescimento da vegetação também contribui neste sentido, pois, segundo Pruski (2009a), diminui o efeito erosivo das chuvas e do escoamento superficial.

As condições de drenagem também exercem grande influência sobre a produção de sedimentos, pois uma concentração de fluxos sobre a pista de rolamento, intensifica a erosão (MOLL; COPSTEAD; JOHANSEN, 1997; LUCE; BLACK, 1999; SHERIDAN *et al.*, 2006). Uma drenagem para dentro concentra água e sedimentos no interior da seção da estrada, longe das laterais geralmente produzidas por aterro; uma drenagem para fora promove maiores taxas de desprendimento e transporte de sedimentos, pois a água escoar através dos aterros laterais quando estes não possuem barreiras de proteção (MOLL; COPSTEAD; JOHANSEN, 1997).

A drenagem para ambos os lados é a que apresenta menor potencial para a retirada de sedimentos. Isso ocorre porque a enxurrada gerada e escoada ao longo do trecho de estrada torna-se reduzida, pois o fluxo total é dividido para ambos os lados – direito e esquerdo – e, desse modo, tanto a valeta de pé quanto o aterro lateral recebem menor volume de escoamento superficial, conseqüentemente, liberam menores quantidades de sedimentos (MOLL; COPSTEAD; JOHANSEN, 1997).

Quanto mais utilizadas, maiores são as necessidades de manutenção, todavia, tanto o tráfego de veículos quanto as manutenções disponibilizam uma grande quantidade de sedimentos (REID; DUNNE, 1984). Quanto ao tráfego, a pressão exercida pelos pneus provoca a desagregação e a trituração dos materiais de cobertura da pista de rolamento e a maior ou menor disponibilização de partículas depende das condições da estrada, condições dos veículos, da freqüência do tráfego, dentre outros (SHERIDAN *et al.*, 2006). Segundo Coker, Fahey e Payne (1993), a carga de sedimentos finos pode ser aumentada quando veículos trafegam durante os períodos de chuvas.

Manutenções são necessárias para permitir boas condições de deslocamento, ao mesmo tempo, possibilitam que os sulcos gerados na pista de rolamento sejam corrigidos (BURROUGHS; KING, 1989). Para manter uma boa condição de tráfego, é comum o lançamento de cascalhos sobre o leito da estrada (GRIEBELER; PRUSKI; SILVA, 2009), no entanto, na maioria das vezes, as manutenções são constituídas apenas de nivelamentos da pista que revolvem o solo e disponibilizam uma grande massa de sedimentos para serem transportadas pelo escoamento (FONTANA; LIMA; FERRAZ, 2007; RAMOS-SCHARRÓN; MACDONALD, 2005).

Quando cascalhadas, além de melhorar a condição de tráfego, as estradas produzem menores quantidades de sedimentos (SHERIDAN; NOSKE, 2007), visto que, materiais com maiores diâmetros oferecem maior resistência à ação cisalhante do escoamento (SUGDEN; WOODS, 2007), mas nem sempre os materiais lançados são de boa resistência (RAMOS-SACHARRÓN; MACDONALD, 2005). Assim, a produção de sedimentos é dependente não somente da textura, mas também da resistência dos materiais lançados sobre a pista, sendo minimizada quando utilizadas rochas trituradas (BURROUGHS; KING, 1989).

3.2.3 Monitoramento da produção de sedimentos em estradas não pavimentadas

3.2.3.1 Técnicas de monitoramento

No monitoramento da produção de sedimentos em estradas, várias técnicas vêm sendo empregadas, dentre estas, a utilizada por Reid e Dunne (1984) que coletaram amostras de enxurrada durante os eventos de chuva, utilizando baldes com volume conhecido, colocados diretamente na boca do tubo que concentrava todo o escoamento proveniente da estrada avaliada. O tempo de preenchimento dos baldes foi registrado para determinar a vazão do escoamento e amostras de 0,5 a 1 litro foram retiradas dos baldes para determinar a concentração de sedimentos.

Coker, Fahey e Payne (1993), sob chuva simulada, canalizaram o escoamento para dentro um tambor onde os sedimentos grosseiros foram retidos. Uma calha em V foi instalada na saída deste tambor e o nível da lamina d'água foi registrada para determinar a vazão do fluxo. Amostras 0,5 litro foram coletadas, a cada 2 ou 10 minutos, para determinar as concentrações de sedimentos, integrá-las com as vazões de escoamento e determinar a produção de sedimentos em cada evento.

Luce e Black (1999), Black e Luce (2007) utilizaram tanques de metal (Figura 5) para, através de tubos de PVC, captar o escoamento gerado e determinar a massa de solo transportada. Posteriormente, com a utilização de um guindaste e uma balança, o tanque contendo a mistura água-sedimento foi pesado e, a partir do peso do tanque contendo somente água, densidade da água e dos sedimentos, foi determinada a massa de solo retida no tanque.



Figura 5 – Retenção de sedimentos em tanques.
Fonte: Black e Luce (2007)

Garcia *et al.* (2003) utilizaram um sistema formado por três tanques (Figura 6) interligados através de tubos de PVC. Os tanques foram dotados de furações de igual diâmetro, localizadas na borda superior, niveladas, permitindo que o primeiro tanque, depois de completado, direcionasse 1/5 do volume excedente para o segundo tanque e, o segundo tanque, direcionasse 1/5 de seu excedente para o terceiro. O volume retido em cada tanque foi homogeneizado e amostras foram coletadas para determinar a concentração de sedimentos.



Figura 6 – Retenção de sedimentos em sequência de tanques.
Fonte: Garcia *et al.* (2003)

Ramos-Scharrón e Macdonald (2005), Ramos-Scharrón (2010) utilizaram filtros de tecido (Figura 7), instalados verticalmente, colocados abaixo do ponto de concentração da drenagem proveniente da estrada, para permitirem a passagem da água e reter sedimentos. Na parte superior, estas barreiras eram presas a peças metálicas e, na parte inferior, eram fixadas com pedras e grampos para evitar o escoamento sob o filtro e facilitar a remoção dos sedimentos. Após cada evento chuvoso, os sedimentos eram misturados, coletados e pesados.



Figura 7 – Retenção de sedimentos em filtros de tecido.
Fonte: Ramos-Scharrón (2010)

Croke *et al.* (2006) dividiram os trechos de estradas em sub-parcelas para coletar amostras de sedimentos (Figura 8), sob chuva simulada. Avaliaram a produção da pista de rolamento (A), drenagem (B), taludes/vertentes (C) e o total de todas as parcelas (D). Amostras da parcela A foram coletadas com de bombas de sucção. Em C foi instalada uma calha associada a um coletor. Em B foi instalado um coletor e em D foi instalada uma calha utilizada para medir o fluxo total. As amostras foram tomadas a cada intervalo de 3 minutos.

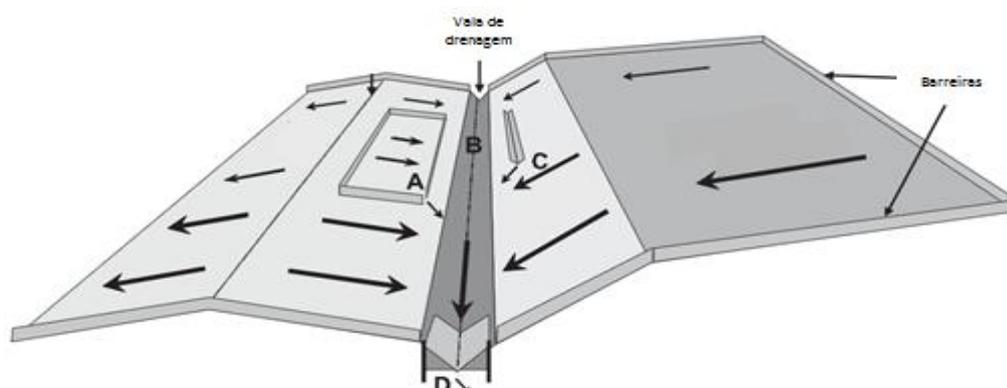


Figura 8 – Avaliação da produção de sedimentos em sub-parcelas.
Fonte: adaptado de Croke *et al.* (2006)

Sheridan e Noske (2007), Black e Luce (2007), utilizaram um sistema onde, após a retenção dos sedimentos grosseiros em calhas/tanques, o escoamento foi direcionado para um recipiente contendo duas câmaras em forma de V (Figura 9). Ao ser preenchida, uma das câmaras derramava seu conteúdo sobre um tubo com uma fenda e uma amostra composta era gerada. Após conhecida a concentração da amostra composta, a massa de sedimentos grosseiros e o número de tombamentos registrados num data logger, foi possível quantificar a produção de sedimentos.

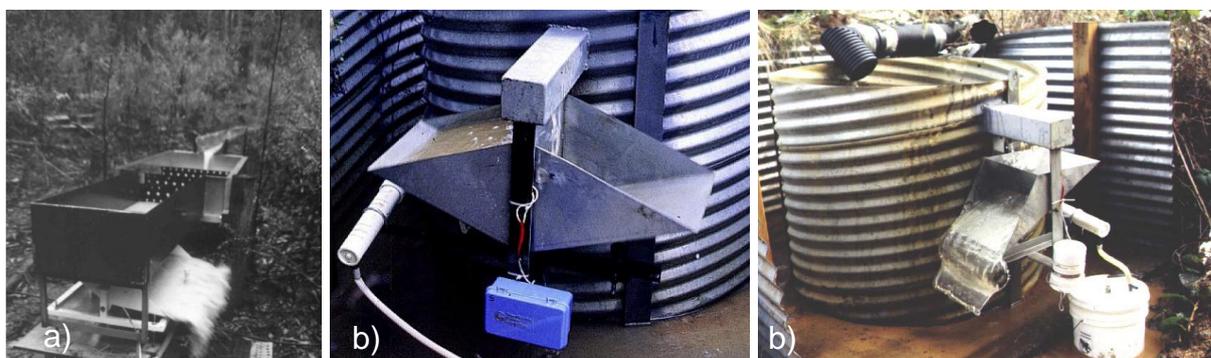


Figura 9 – Medidor de fluxo/Amostrador de sedimentos em suspensão.
Fonte: a) Sheridan e Noske (2007); b) Black e Luce (2007).

Turton, Smolen e Stebler (2009) utilizaram calhas com sensores de pressão (Figura 10) para medir os fluxos superficiais. Os sedimentos grosseiros foram retidos em cestas plásticas instaladas nas calhas e amostras do escoamento contendo os sedimentos transportados em suspensão foram coletados através de amostradores automáticos. Após cada evento de chuva, os sedimentos retidos em cada cesta foram recolhidos e pesados. Definida a concentração da amostra, sedimentos retidos e suspensos forneceram o total produzido em cada evento.



Figura 10 – Amostragem com calhas e amostradores automáticos.
Fonte: Turton, Smolen e Stebler (2009)

Corrêa (2005), Corrêa e Dedecek (2009) avaliaram a perda de solo e água com a utilização de um amostrador de enxurrada do tipo Coshocton (Figura 11) que consiste em uma calha – para reter sedimentos grosseiros – e uma roda com ranhuras na superfície, que gira com o fluxo e capta 1% do volume total escoado, através de uma fenda, e o direciona para um tanque. As amostras coletadas da calha juntamente com as amostras retiradas do tanque foram utilizadas para quantificar a produção de sedimentos nos trechos de estradas monitorados.



Figura 11 – Amostrador de enxurrada tipo Coshocton.
Fonte: a) Corrêa (2005); b) Corrêa e Dedecek (2009)

Tendo em vista os vários elementos que influenciam na produção de sedimentos em estradas não pavimentadas, é de grande importância que os aspectos que serão investigados estejam claramente definidos, pois esta ação interfere diretamente na escolha dos trechos a serem avaliados. Definidos os objetivos da investigação, segundo Coker, Fahey e Payne (1993) é importante que os trechos escolhidos apresentem dimensões que sejam representativas da estrada a ser monitorada.

Quanto mais semelhantes os trechos de estradas não pavimentadas a serem avaliados, melhores serão as condições para realizar a comparação dos resultados obtidos no monitoramento da produção de sedimentos. Deve-se, portanto, realizar a escolha de trechos que possuam características similares quanto à declividade, área de captação, cobertura pista, geologia e clima, etc. (SHERIDAN *et al.*, 2006), salvo quando alguma destas características seja objeto de investigação.

Taludes instáveis podem, sob condições de precipitação, apresentar escorregamentos e colocar certa quantidade de material sobre a pista ou sobre a drenagem e aumentar a disponibilidade de material a ser transportado. Assim, os trechos a serem escolhidos devem apresentar os melhores padrões construtivos; devem ser bastante estáveis e, se necessário, devem ser realizados alguns ajustes antes de iniciar o monitoramento (SHERIDAN; NOSKE, 2007).

Considerando que o principal agente erosivo é a água da chuva, a precipitação incidente sobre os trechos de estradas e o escoamento superficial, gerado nas parcelas experimentais, precisam ser quantificados. Para não haver distorções nos resultados, é necessário conter os fluxos provenientes de outras fontes, inclusive de subsuperfície, pois poderão se somar ao fluxo produzido dentro do trecho avaliado (REID; DUNNE, 1984).

A entrada de fluxos adicionais pode colocar sedimentos de outras fontes para dentro dos trechos avaliados. Para conter estes fluxos adicionais, bem como a garantir que o escoamento gerado dentro da parcela não será extravasado para fora dos limites definidos, podem ser utilizadas pequenas elevações (lombadas) no terreno (SHERIDAN *et al.*, 2006), tábuas (GARCIA *et al.*, 2003) valas (DNER, 1997), chapas metálicas (CROKE *et al.*, 2006), dentre outros.

Estradas com pista de rolamento inclinada para dentro, direcionando o escoamento superficial para as valetas de pé, apresentam uma de suas laterais mais elevada, atuando como um dos limitadores da área de contribuição; estradas com pistas de rolamento que drenam o escoamento para fora precisam de uma pequena elevação lateral capaz de conter e direcionar o fluxo para um único ponto, não permitindo que este seja disperso sobre aterros laterais (MOLL; COPSTEAD; JOHANSEN, 1997).

3.2.3.2 Coleta de sedimentos e análises de laboratório

Para realizar o monitoramento da produção de sedimentos em estradas não pavimentadas a escolha da metodologia de amostragem é de grande importância e deve estar adequada aos objetivos a serem atingidos. A não amostragem da carga de partículas transportadas em suspensão pode subestimar as cargas de silte e argila, conseqüentemente, a carga de sedimentos realmente produzida pelo trecho avaliado (SAMPSON, 1999 *apud* RAMOS-SCHARRÓN; MACDONALD, 2007). Isso por que a massa de solo transportada em suspensão pode ser muito maior do que a carga de sedimentos transportados por arrasto e saltação (BLACK; LUCE, 2007).

Sheridan e Noske (2007), por exemplo, constataram que em dez trechos de estradas avaliados, oito destes apresentaram carga de partículas transportadas em suspensão igual ou superior a 80% do total de sedimentos produzidos pelas parcelas experimentais. Sheridan *et al.* (2006) verificaram que 96% da massa de sedimentos produzidos em três trechos de estradas era composta por sólidos suspensos. Grayson *et al.* (1993) constatam que 2/3 da produção de sedimentos em um trecho monitorado era composta por partículas transportadas em suspensão.

Assim, a coleta de amostras de sedimentos grosseiros e finos tem sido utilizada para determinar a produção de sedimentos em uma dada parcela experimental, bem como determinar a granulometria das partículas transportadas pelo escoamento superficial. Regra geral, quanto aos sedimentos grosseiros, as amostras têm sido coletadas e pesadas ainda em campo (peso úmido). Em seguida, sub-amostras são retiradas e enviadas ao laboratório para processamento (RAMOS-SCHARRÓN; MACDONALD, 2007; SUGDEN; WOODS, 2007).

Embora sejam comumente chamadas de amostras de sedimentos grosseiros, estas amostras contêm um resíduo de partículas mais finas, transportadas em suspensão, que permaneceram na calha ou tambor de retenção, ao fim do escoamento (SHERIDAN *et al.*, 2006). Essas amostras, ainda que em laboratório, devem ser mantidas úmidas até próximo da ocasião das análises para não formarem torrões (CARVALHO *et al.*, 2000).

Em laboratório, as sub-amostras são pesadas para determinação do seu peso úmido e colocadas em estufa para secar e determinar o seu peso seco; após conhecido o peso seco, o percentual de umidade da sub-amostra é determinado e utilizado para corrigir o peso úmido total da amostra, medido em campo, e quantificar a carga de partículas transportadas pelo escoamento (SHERIDAN *et al.*, 2006; TURTON; SMOLEN; STEBLER, 2009).

Depois de secadas, as amostras são peneiradas para determinação da granulometria das partículas. Os sedimentos passam por uma série de peneiras – a de maior diâmetro de malha é localizada no topo e a de menor diâmetro na base – que direcionam os sedimentos mais finos para um recipiente; o percentual de sedimentos retidos em cada peneira é obtido pela divisão do peso do material nela contido pelo peso total da sub-amostra em análise (CARVALHO *et al.*, 2000).

Caso o percentual de resíduos finos, após a última peneira, seja maior ou igual a 5%, a granulometria destas partículas que compõem o resíduo, se desejado, deverá ser realizada por outros métodos, dentre estes, o método do tubo de retirada pela base, utilizado também para determinação da granulometria dos sedimentos transportados em suspensão (CARVALHO *et al.*, 2000). No que diz respeito à amostra do escoamento, alguns cuidados também precisam ser observados.

Volumes superiores a 1 litro podem ser necessários para determinação da granulometria dos sólidos suspensos, visto que, concentrações muito baixas não permitem a realização da análise granulométrica, sendo necessária concentrar os sedimentos a partir de volumes maiores (CARVALHO, 2008). Pesquisas realizadas por Reid e Dunne (1984), Coker, Fahey e Payne (1993), Sheridan *et al.* (2006), Sheridan e Noske (2007), registraram concentrações superiores a 100 mg l⁻¹.

Assim, considerando os resultados obtidos nestes trabalhos, juntamente com as orientações de Carvalho (2008), é provável que o volume mínimo de 1 litro, contendo amostra do escoamento, seja suficiente para determinar a concentração e a granulometria das partículas transportadas em suspensão. As amostras devem ser encaminhadas ao laboratório o mais breve possível, pois as partículas finas em suspensão, com cargas contrárias, poderão formar flocos (CARVALHO *et al.*, 2000).

A concentração de sólidos suspensos de cada amostra contendo um volume conhecido pode ser determinada, dentre outros métodos, através de filtração; porém, existem casos em que é grande a concentração ou o teor de argila da amostra e, nesta condição, o método de evaporação torna-se mais recomendado, pois o filtro poderá entupir com facilidade (CARVALHO, 2008). Antes da amostra ser submetida à evaporação, o peso dos sais solúveis precisa ser determinado, caso contrário, serão contabilizados como sedimentos (CARVALHO *et al.*, 2000).

A análise granulométrica do material em suspensão pode ser determinada por vários métodos, dentre estes, o método do tubo de retirada pelo fundo que, basicamente, consiste em colocar a amostra no tubo, colocá-lo em posição vertical em bancada e realizar sucessivas retiradas de sub-amostras em intervalos de tempo pré-definidos. As sub-amostras são submetidas à evaporação em estufa para determinação da massa contida em cada béquer; os resultados são lançados em planilha para posterior traçado da Curva de Oden, através da qual são obtidas as porcentagens correspondentes à granulometria das partículas (CARVALHO *et al.*, 2000).

3.2.3.3 Avaliação da produção de sedimentos em estradas não pavimentadas.

Garcia *et al.* (2003) avaliaram a perda de solos em 4 trechos de estradas florestais localizados em Agudos, São Paulo, através da metodologia descrita no item 3.5. Os trechos avaliados apresentavam 4m de largura, declividade de 1% e 7%, com 20 e 40m de comprimento e solo constituído em sua maior parte (40%) de areia fina e média (43%). Avaliaram a perda de solos em 14 níveis de precipitação que variaram de 7mm a 79mm. As maiores perdas ocorreram durante a precipitação de 65mm em que foi produzido, em média, 0,047 kg m⁻² no trecho de 40m e 7% de inclinação.

Corrêa e Dedecek (2009) avaliaram a perda de solos em estradas de uso florestal no município de Três Barras, Santa Catarina, através da metodologia citada no item 3.5. Foram delimitados três trechos de estradas dos quais um destes não recebeu qualquer tipo de tratamento (barreiras para contenção do escoamento superficial). Este trecho apresentava dimensões médias de 6m de largura por 100m de comprimento, 7% de declividade, situado sobre um terreno de Argissolo Vermelho escuro, apresentou uma produção de sedimentos inferior $0,4 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, visto que este valor foi obtido em um período de medição pouco superior a 1 ano (março/03 a junho/04).

Fahey e Coker (1989) realizaram o monitoramento da produção de sedimentos em estradas florestais com solos rasos e inclinados de origem granítica, em região de clima temperado úmido (Nova Zelândia). Cinco trechos com declividade de 3,5% a 7,5% foram submetidos à manutenção para representar as condições logo após a construção. O escoamento superficial foi captado por tubo e direcionado para dentro de tambores onde os sedimentos ficaram retidos. Uma calha em V, do primeiro para o segundo tambor, foi utilizada para medir o fluxo através de instrumentos. A produção média de sedimentos esteve entre $1,6$ e $11,3 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$. A contribuição para pouco tempo depois da construção foi estimada em 3 a $4 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$.

Grayson *et al.* (1993) avaliaram a produção de sedimentos em dois trechos de estradas (Austrália) para verificar o efeito do uso e da manutenção combinados. Para isso, um dos trechos (18% de declividade) foi submetido à manutenção. Instalaram amostradores automáticos para coletar parcelas de fluxo e obter a concentração de sedimentos. Os sedimentos grosseiros foram direcionados para uma calha do tipo Coschocton. Foram definidos dois níveis de uso, dois níveis de manutenção e dois níveis de cascalhamento. Como resultado, foi verificado que a produção de sedimentos grosseiros de uma estrada, representativa do local, estava entre $1,5$ a $2,5 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, e a produção de sedimentos suspensos estava entre $3,5$ e $6,5 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$. Na condição de elevado uso (veículos realizando acima de 15 passes por semana) e elevada manutenção (limpeza da pista de rolamento e vala de drenagem regularmente) foram produzidos $5,2 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$.

Sugden e Woods (2007) monitoraram 20 trechos em Western Montana (US), utilizaram a metodologia composta pelas câmaras de tombamento, para medir fluxo e coletar amostras dos sedimentos transportados em suspensão, acopladas a um tambor para reter os sedimentos grosseiros. 12 parcelas foram submetidas à manutenção no início do estudo, 5 após terem sido iniciadas as experimentações e 3 não foram submetidos aos nivelamentos. A produção de sedimentos, média anual, foi $0,21 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ em 2003 e $0,99 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ em 2004. Através da aplicação de equações de regressão, após o isolamento do tempo desde a manutenção de outras variáveis, constataram que a perda de solos, em uma estrada com 6,1% de declividade e 47,2% de cascalhos, e precipitação de 180mm, declina em 63% e 86% no segundo e terceiro ano após a manutenção, respectivamente.

Ramos-Scharrón e Macdonald (2005) desenvolveram pesquisas em St. Jhon (US Virgin Islands) para avaliar a produção de sedimentos em 21 trechos de estradas, através da metodologia que utiliza filtros de tecido para reter sedimentos. Os trechos foram divididos em 03 categorias: nivelados, não nivelados e abandonados. A produção média de sedimentos das estradas niveladas foi $11 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$. Constataram também que a produção de sedimentos para estradas submetidas à manutenção aumentou exponencialmente com acréscimos na declividade.

Ramos-Scharrón e Macdonald (2007) avaliaram 4 trechos de estradas, submetidos ao tráfego de veículos leves, em St. Jhon (US Virgin Islands). Os trechos foram submetidos à manutenção duas vezes durante o período de estudo. Setenta amostras de escoamento foram coletadas e estas apresentaram concentrações que variaram de 1270 mg l^{-1} a 84400 mg l^{-1} . A concentração média obtida foi 20800 mg l^{-1} . Vinte e sete destas amostras, coletadas após a manutenção das estradas, forneceram uma média de 30000 mg l^{-1} . A produção de sedimentos foi estimada em $36 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$.

3.3 Correlação entre variáveis

O grau da relação linear entre duas variáveis ($x;y$) pode ser medida através do coeficiente de correlação (r). Este coeficiente amostral, através de um *Teste-t*, é capaz indicar se existe, ou não, correlação significativa entre os dados populacionais (ρ) de onde foi extraída a amostra. Os coeficientes de determinação (r^2), também utilizados, representam em números percentuais quanto da variação de y pode ser explicada pela relação entre x e y ; o restante ($1- r^2$) representa quanto da variação de y é explicada por outros fatores ou erros amostrais (LARSON; FARBER, 2007).

Para maior rapidez na aplicação do *Teste-t*, definido o nível de significância (α) e o número de pares ordenados (n), a Tabela 2 pode ser utilizada. A correlação populacional (ρ) será significativa se o coeficiente de correlação amostral (r) for superior ao valor crítico indicado para o nível de significância escolhido. Este nível de significância indica o percentual de vezes em que a correlação populacional é considerada significativa, quando isso não é verdade.

Em trabalhos que tratam da avaliação da produção de sedimentos em estradas não pavimentadas, os coeficientes de correlação e de determinação são amplamente utilizados para verificar a relação entre variáveis tais como, produção de sedimentos e erosividade da chuva (MACDONALD; SAMPSON; ANDERSON, 2001), produção de sedimentos e precipitação total (GARCIA *et al.*, 2003), precipitação total e erosividade da chuva (RAMOS-SCHARRÓN, 2010), dentre outros.

TABELA 2 - VALORES CRÍTICOS PARA O COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO

n	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	n	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
4	0,950	0,990	15	0,514	0,641
5	0,878	0,959	16	0,497	0,623
6	0,811	0,917	17	0,482	0,606
7	0,754	0,875	18	0,468	0,590
8	0,707	0,834	19	0,456	0,575
9	0,666	0,798	20	0,444	0,561
10	0,632	0,765	21	0,433	0,549
11	0,602	0,735	22	0,423	0,537
12	0,576	0,708	23	0,413	0,526
13	0,553	0,684	24	0,404	0,515
14	0,532	0,661	25	0,396	0,505

Fonte: Adaptado de Larson e Farber (2007)

4. METODOLOGIA

4.1 Local de estudo e escolha dos trechos de estradas monitorados

A avaliação da produção de sedimentos em estradas não pavimentadas foi realizada no município de Santa Teresa (ES), no período de 15/09/12 a 15/03/13, numa área de transição entre a Região Alta e a Região Baixa, com predomínio de um clima quente e seco, característico da Região Baixa, precipitação média anual de 1004mm, chuvas concentradas de outubro a abril (Figura 12) e temperatura média anual de 23,1°C (INCAPER, 2011). Os trechos escolhidos localizam-se em duas estradas não pavimentadas da bacia do rio Perdido (Figura 13), que pertence à bacia hidrográfica do rio Santa Maria do Doce, um afluente do rio Doce.

A bacia do rio Perdido apresenta relevo ondulado a forte ondulado com algumas faixas de relevo montanhoso a escarpados, compreendidos entre 150m e 800m de altitude, cobertos por argissolos vermelho amarelo, onde predominam atividades de cafeicultura alternada com pastagens, associadas a outras culturas menos expressivas (DALLA, 2011). Nesta micro-bacia, a adoção de práticas não conservacionistas de uso do solo, muito presentes na Região Baixa do município, são frequentemente observadas, dentre estas, estradas com inadequadas condições de drenagem das pistas de rolamento (INCAPER, 2011).

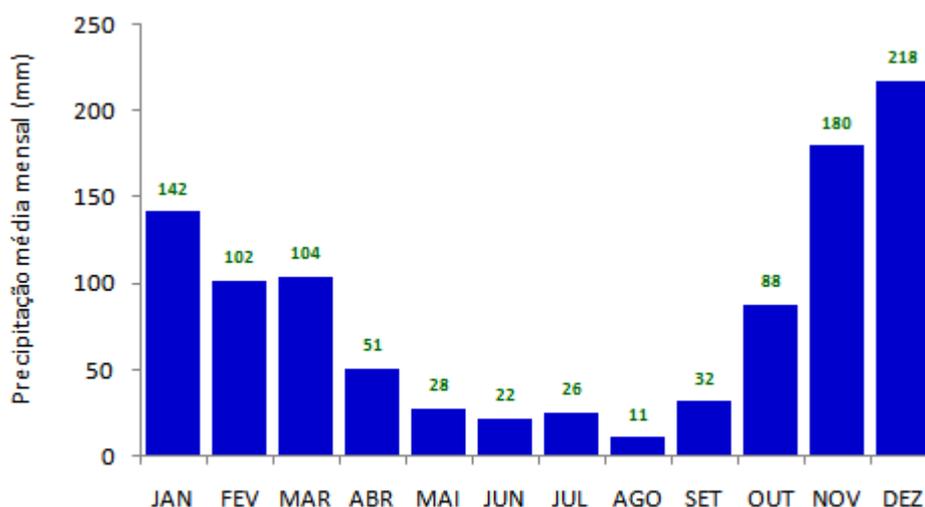


Figura 12 – Precipitação média mensal na Região Baixa de Santa Teresa – ES.
Fonte: INCAPER (2011)

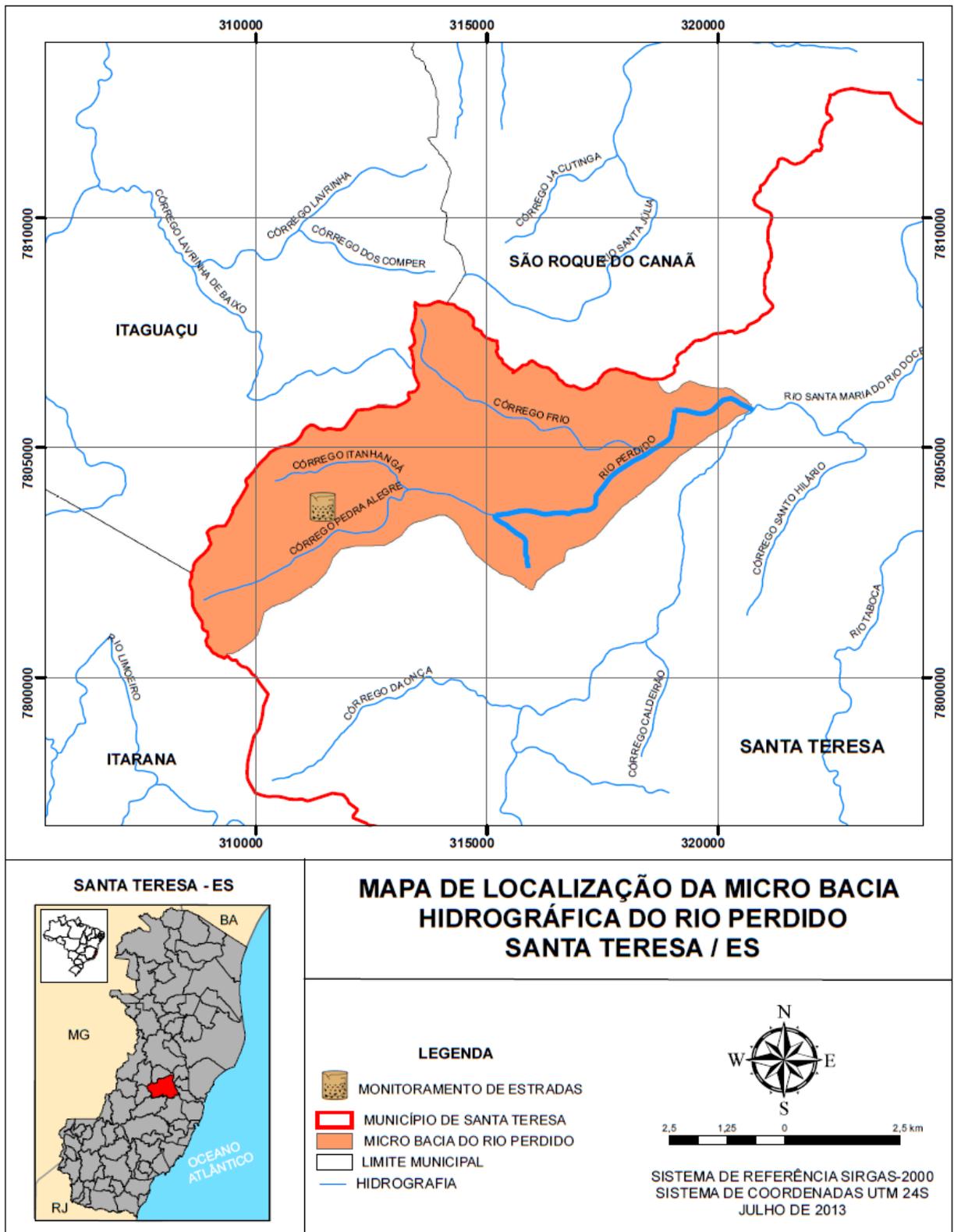


Figura 13 - Localização da bacia do rio Perdido.

Para fins desta pesquisa, dois níveis de uso foram estabelecidos, sendo estes: maior uso e menor uso. Assim, foi definido como trecho de maior uso (Figura 14a) aquele localizado em uma estrada não pavimentada onde diariamente ocorreu o tráfego de veículos leves e/ou pesados, cuja pista de rolamento foi submetida à manutenção. O trecho de menor uso (Figura 14b) foi definido como aquele localizado em uma estrada de uso interno de uma propriedade rural, não submetida à manutenção, onde o tráfego de veículos leves ocorreu eventualmente.

Vários parâmetros foram considerados na escolha destes trechos, tais como declividade, comprimento, largura, estabilidade e inclinação dos taludes, bem como uma menor distância entre os trechos a serem monitorados para que, de acordo com Sheridan *et al.* (2006), os aspectos físicos naturais fossem semelhantes. Porém, um dos aspectos mais importantes foi identificação de trechos com características favoráveis à instalação de valas de proteção acima dos taludes, para garantir a captação do escoamento superficial proveniente das áreas adjacentes.



Figura 14 – Trechos de estradas monitorados – maior (a) e menor uso (b).

Foram escolhidos trechos que não apresentassem grandes mudanças na declividade ao longo do eixo longitudinal da estrada para evitar superfícies côncavas, favoráveis à deposição de sedimentos. Estas parcelas experimentais apresentavam dimensões médias representativas dos demais trechos da estrada, conforme sugerido por Coker; Fahey e Payne (1993) e não foram constatadas contribuições de sub-superfície fornecidas pelos taludes, possivelmente, de acordo com Ziegler *et al.* (2001), devido à grande profundidade do solo.

O trecho de maior uso apresentava uma declividade média de 10,4%, 120m de comprimento, largura média de 6,6m e uma área de 784m². A área total disponível para geração de sedimentos, obtida a partir do perímetro da seção da estrada (Figura 15) e do comprimento do trecho monitorado, era de 849m². Neste trecho, a interferência na precipitação incidente, provocada por uma árvore (abacateiro), foi desconsiderada, pois esta apresentava pequenas dimensões; a pista de rolamento apresentava mudanças na direção da drenagem, porém a elevação lateral realizava a contenção do escoamento superficial quando a drenagem era voltada para fora.

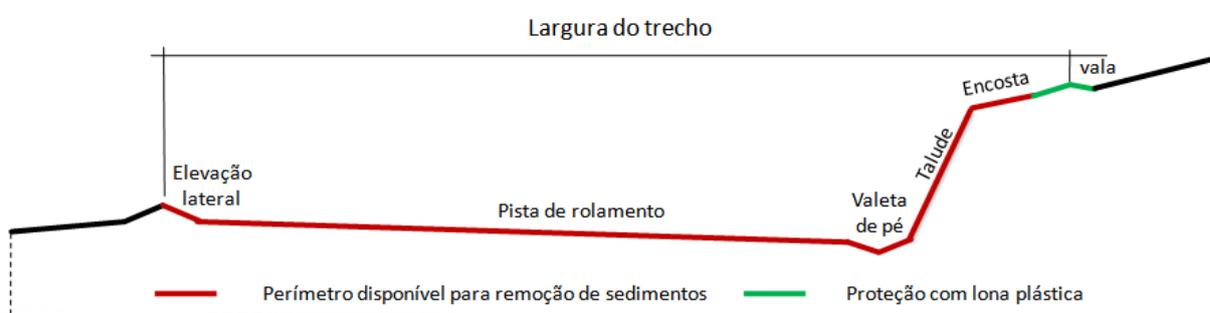


Figura 15 – Seção do trecho de maior uso com drenagem para dentro da estrada.

O trecho de menor uso apresentava 115m de comprimento, largura média de 6,4m, 742m² de área para incidência da precipitação e 792m² de superfície disponível para gerar sedimentos. Neste trecho a declividade média era de 8,1% com drenagem constantemente voltada para dentro da seção da estrada, embora não apresentasse vala de drenagem. Para ambos os trechos, a declividade média (Figura 16) foi obtida através de nivelamento geométrico, empregado conforme metodologia descrita por Veiga; Zanetti; Faggion (2012).

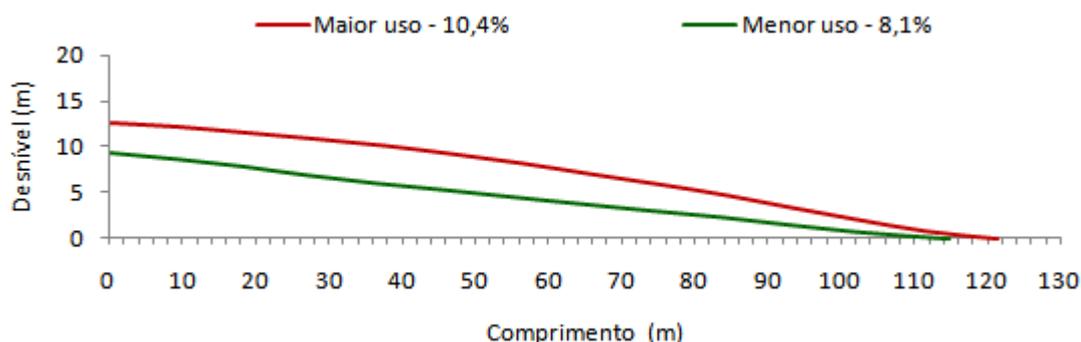


Figura 16 – Perfil longitudinal dos trechos de estradas monitorados.

4.2 Monitoramento e coleta de sedimentos.

Tendo vista a importância de quantificar separadamente a produção de sedimentos grosseiros e finos, foi empregada uma técnica de monitoramento semelhante àquela utilizada por Black e Luce (2007) e Sheridan *et al.* (2006), basicamente constituída por um tambor de retenção de sedimentos e um medidor de fluxo. Todas as etapas foram executadas com recursos do Programa de Apoio a Pesquisa (PROAP) e do Laboratório de Hidráulica e Monitoramento Ambiental (LABHIDRO/UFES), onde as amostras foram analisadas.

De modo geral, o medidor de fluxo é constituído de duas câmaras instaladas sobre um eixo que, ao serem preenchidas, uma por vez, giram o eixo sobre a qual estão instaladas, liberam o volume contido em seu interior e disponibiliza a outra câmara para preenchimento. Externamente, um ímã, instalado para fechar o contato em uma pequena chave (*reed switch*) permite a passagem de uma corrente elétrica captada e registrada como pulso em um datta logger (SHERIDAN *et al.*, 2006).

Pequena parcela do fluido derramado por uma das câmaras, em cada tombamento, é coletada através de uma fenda – localizada em um tubo de PVC – e conduzida para um recipiente onde, juntamente outras parcelas, formam uma amostra composta do escoamento superficial (BLACK; LUCE, 2007). Assim, além de constituir uma técnica de baixo custo para realizar medições de fluxo (EDWARDS; JACKSON; FLEMING, 1974), é possível monitorar a produção sedimentos transportados em suspensão, como fizeram Sheridan e Noske (2007).

O princípio funcional da técnica de monitoramento utilizada nesta pesquisa para avaliar a produção de sedimentos nos trechos de estradas consistiu em captar o escoamento superficial e direcioná-lo, através de tubos de PVC, para o tanque de retenção de sedimentos. Com a elevação da lâmina d'água dentro do tambor, o escoamento foi direcionado para o medidor de fluxo e deste para o ambiente, exceto a amostra composta que ficou armazenada em recipientes plásticos.

O monitoramento foi executado dentro das seguintes condições:

- I. O escoamento superficial foi produzido unicamente pela chuva incidente dentro do trecho de estrada monitorado; não houve contribuição de subsuperfície; não houve contribuição das áreas adjacentes.
- II. Os sedimentos transportados pelo escoamento superficial foram gerados no interior da parcela experimental, através do processo erosivo ocorrido nas seguintes partes da estrada: elevação lateral, pista de rolamento, vala de pé, talude e pequena parcela da vertente localizada acima do talude;
- III. Os sedimentos produzidos no trecho de menor uso pertencem ao solo sobre o qual foi construída a estrada. No trecho de maior uso, essa condição não pode ser garantida, visto que, materiais de outras origens foram colocados sobre a pista durante as atividades de manutenção;
- IV. O crescimento da vegetação dentro dos trechos monitorados não foi interrompido. Limpezas para retirada de galhos e folhas foram eventualmente executadas apenas para evitar obstruções ao fluxo nas tubulações que conduziram o escoamento para o tambor de retenção de sedimentos;
- V. A amostra de sedimentos transportados por arrasto foi contabilizada a partir da soma dos sedimentos retidos no tambor acrescido da carga de sedimentos que ficaram retidos no tubo de PVC, ambos pertencentes a um mesmo evento de chuva.
- VI. Evento de chuva e amostragem (coleta de campo).
 - a. Foram considerados como eventos de chuva distintos, as chuvas separadas em no mínimo 6 horas, em que houve geração de escoamento superficial em pelo menos um dos trechos monitorados; chuvas separadas com intervalos menores que 6h foram consideradas como pertencentes a um mesmo evento.

- b. A amostragem (coleta) foi realizada logo após a interrupção das chuvas. Quando isso não foi possível, as cargas de sedimentos geradas por eventos distintos foram somadas;
- c. A erosividade da chuva (EI30) foi determinada para cada evento. Quando houve mais de um evento de chuva, em uma mesma amostragem, as erosividades de cada evento foram somadas;
- d. Realizada uma amostragem (coleta), o evento de chuva foi considerado encerrado e outro evento foi iniciado, ainda que não tivesse decorrido intervalo superior a 6 horas, contado do fim do evento anterior.
- e. Finalizadas as coletas, o tanque de retenção de sedimentos e os medidores de fluxo foram submetidos à limpeza e disponibilizados para uma próxima amostragem.

4.3 Projeto, construção e calibração dos medidores de fluxo

Os medidores de fluxo foram projetados e construídos a partir projeto proposto por Black e Luce (2007) com dimensões adequadas às necessidades deste monitoramento. O Método Racional (Equação 7) foi utilizado para determinar a vazão de escoamento superficial máxima (vazão de projeto) para uma área estimada de 800m² (0,08ha). A intensidade máxima média de precipitação (59,2 mm h⁻¹) foi determinada através da Equação 8, proposta por Valverde *et al.* (2003), para uma chuva com duração de 60 minutos e Tr de 5anos (q_{Trd} = 1,259).

$$\hat{I}_{T,d,j} = 8403,014d^{-0,777} P_j^{-0,290} q_{Td} \quad (8)$$

Em que,

d = duração da precipitação em minutos

$\hat{I}_{T,d,j}$ = estimador da intensidade máxima média de precipitação (mm h⁻¹), de duração d (min), no local j dentro de uma região homogênea, associado ao período de retorno T (anos).

P_j = precipitação média anual do local (j) em estudo.

q_{Trd} = quantil adimensional regional de frequência associado a uma duração d e a um período de retorno T, de validade regional.

Assim, para uma precipitação média anual de 1004mm (INCAPER, 2011) e um coeficiente de escoamento de 0,7 - pouco inferior ao máximo coeficiente obtido por Ramos-Scharrón e Macdonald (2007) – foi obtida a vazão de projeto de $0,0092 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ($9,2 \text{ l s}^{-1}$). Para captação do escoamento foram utilizados tubos de PVC com 100mm de diâmetro que, para as condições de instalação em campo (15 metros de comprimento e 1 metro de desnível) permitiam uma vazão de até 19 l s^{-1} .

Uma abertura $14\text{cm} \times 14\text{cm}$ na parte superior do tambor foi utilizada para permitir o escoamento do fluxo até as câmaras de tombamento (Figura 17), dimensionadas com capacidade superior a $9,2 \text{ l}$ ($b= 26,6\text{cm}$; $h=33,5\text{cm}$; $l=26,6\text{cm}$) para garantir um intervalo de tempo superior 1 segundo entre dois tombamentos consecutivos.

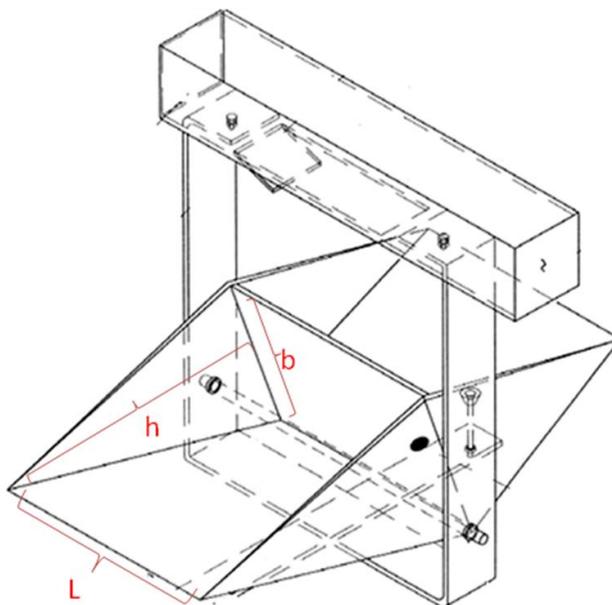


Figura 17 – Câmaras do medidor de fluxo.
Fonte: adaptado de Black e Luce (2007).

O tambor de retenção (removível) foi adaptado a partir de um tonel metálico de 150 litros e, na parte inferior, foi instalado um tampão rosqueável ($\varnothing 6\text{cm}$) para drenar e coletar os sedimentos retidos. As câmaras foram construídas em fibra de vidro, instaladas sobre uma estrutura metálica. Uma vez que pequenos volumes de água disparavam tombamentos, contrapesos – barras chatas – foram instalados na parede central que limita as duas câmaras para ajustar a capacidade de tombamento, conforme orientado por Edwards, Jackson e Fleming (1974).

O data logger (Figura 18a), associado a um ímã e a um *reed switch*, foi instalado e programado para registrar o número de tombamentos por minuto. Um tubo de PVC (\varnothing 40mm) fechado nas extremidades, dotado de ranhura central (Figura 18b), foi instalado sobre um suporte metálico e utilizado para coletar parcela do volume desprezado durante o tombamento da câmara esquerda de cada medidor de fluxo. As subamostras captadas pelo tubo foram conduzidas através uma mangueira flexível para recipientes plásticos onde ficavam armazenadas.



Figura 18 – Data logger (a) e tubo coletor de amostra composta (b).

Para calibração (Figura 19) foram utilizadas vazões de $0,25 \text{ l s}^{-1}$; $0,5 \text{ l s}^{-1}$; $1,0 \text{ l s}^{-1}$; $1,96 \text{ l s}^{-1}$ e $2,45 \text{ l s}^{-1}$. Após estabelecer a relação entre a vazão (Q) e o número de tombamentos (T_b) por minuto (Figura 20), a relação entre volume médio liberado por cada câmara (V_c) e a vazão foi estabelecida (Figura 21). Assim, as equações 9, 10, 11 e 12 foram obtidas a partir das curvas de melhor ajuste destas relações (curvas de calibração). Os tubos de PVC capturaram, em média, 141ml (P1) e 120ml (P2), e praticamente não apresentaram variações do volume com acréscimos de vazão.



Figura 19 – Calibração dos medidores de fluxo

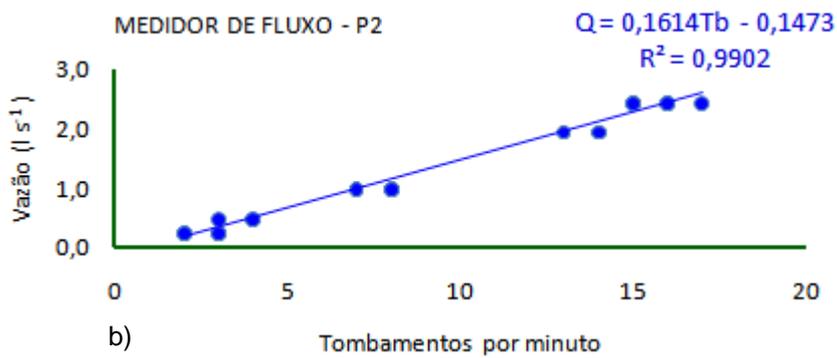
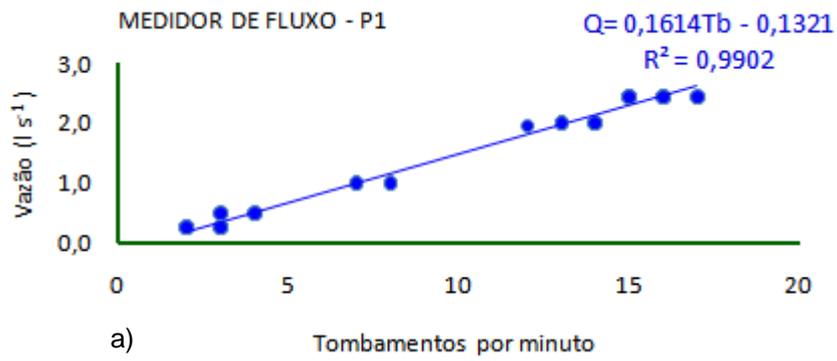


Figura 20 – Curvas de calibração vazão x tombamentos por minuto dos medidores P1 (a) e P2 (b).

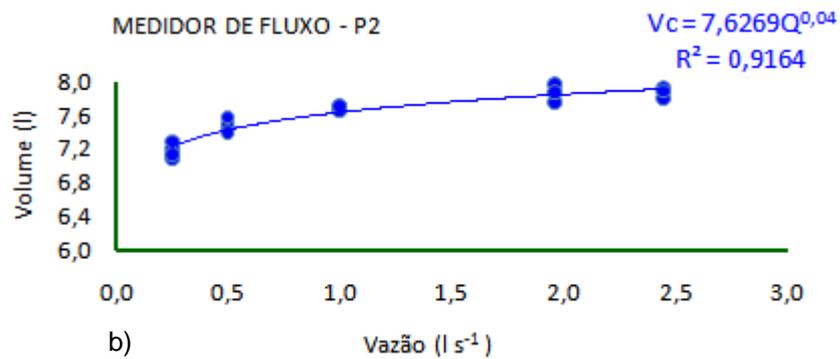
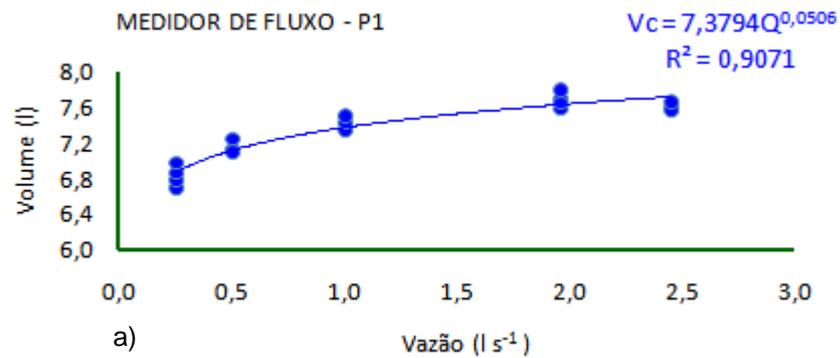


Figura 21 – Curvas de calibração volume x vazão dos medidores P1 (a) e P2 (b).

Equações de calibração do medidor de fluxo P1

$$Q = 0,1614Tb - 0,1321 \quad (9)$$

$$Vc = 7,3794Q^{0,0506} \quad (10)$$

Equações de calibração do medidor de fluxo P2

$$Q = 0,1614Tb - 0,1473 \quad (11)$$

$$Vc = 7,6269Q^{0,04} \quad (12)$$

Em que,

Q= vazão de escoamento superficial ($l s^{-1}$).

Tb= número de tombamentos registrados no intervalo de 1 minuto.

Vc= volume médio despejado pela câmara em cada tombamento (l).

4.4 instalação de equipamentos, coleta e processamento de amostras

Para proteger os dois trechos monitorados de contribuições laterais, foram construídas valas de proteção acima dos taludes; os sedimentos liberados pelos cortes no terreno foram protegidos com lonas plásticas (Figura 22). Para delimitar longitudinalmente os trechos, foram construídas duas valetas, uma à montante e outra à jusante. A valeta de jusante tinha a função captar o escoamento e direcioná-lo para tubos de PVC (Figura 23) de onde era conduzido para o tanque de retenção.

O terreno foi preparado e os equipamentos instalados sobre uma estrutura de madeira. Um cano adaptado com mangueiras flexíveis foi utilizado para coletar e direcionar as sub-amostras do escoamento superficial para recipientes plásticos. Um sistema de limpeza constituído por esponjas (Figura 24) foi instalado para retirar os sedimentos que ficaram retidos no tubo, após um evento de chuva. O medidor P1 foi instalado no trecho de maior uso e o medidor P2 (Figura 25) no trecho de menor uso. Nas proximidades foi instalado um pluviógrafo para realizar registros de precipitação.



Figura 22 – Valetas de proteção acima dos taludes no trecho de menor uso.



Figura 23 – Tubos de PVC para captação do escoamento no trecho de maior uso.



Figura 24 – Limpeza das tubulações com esponjas.



Figura 25 – Medidor de fluxo P2.

Antes de realizar a coleta das amostras, caso o nível máximo da lâmina d'água dentro do tambor não tivesse sido atingida, a altura desta lâmina era medida com uso de haste graduada, para posterior determinação do volume de escoamento superficial gerado no evento de chuva. Realizada a limpeza interna da tubulação com esponjas, os tambores eram drenados. Para amostras pequenas – menores que 2kg, aproximadamente – os sedimentos eram retirados pelo dreno; amostras maiores eram retiradas com vasilhas (Figura 26) e o resíduo através do dreno.



Figura 26 – Coleta de sedimentos grosseiros retidos no tambor.

Para a coleta da amostra composta do escoamento superficial, todos os recipientes foram vistoriados e aqueles que apresentavam líquido em seu interior foram retirados e identificados. Finalizado o procedimento de coleta de amostras, os equipamentos foram limpos e disponibilizados para uma nova amostragem. Todas as amostras foram identificadas, transportadas e guardadas em local arejado, sem incidência de raios solares.

Ainda em campo, as amostras foram pré-processadas, exceto aquelas geradas nos primeiros eventos, pois havia a necessidade de conhecer suas características, bem como definir com mais detalhes a metodologia de trabalho. Regra geral, as amostras permaneceram em campo alguns dias. No momento de realização do pré-processamento, estas amostras apresentavam separação de fases, cuja fase líquida das amostras de sedimentos grosseiros coletadas do tambor, foi drenada com uma mangueira flexível e desprezada no ambiente.

Estas amostras foram pesadas, homogeneizadas (Figura 27a) e uma sub-amostra de aproximadamente 1kg foi retirada; o restante foi desprezado no ambiente. As amostras compostas do escoamento superficial foram homogeneizadas (Figura 27b), uma sub-amostra de aproximadamente 900ml foi coletada e o excedente desprezado no ambiente. Amostras de sedimentos retidos no tanque de retenção, menores que 1kg, e amostras compostas com volumes menores ou iguais a 1litro, foram consideradas no todo, sem a retirada de sub amostras.

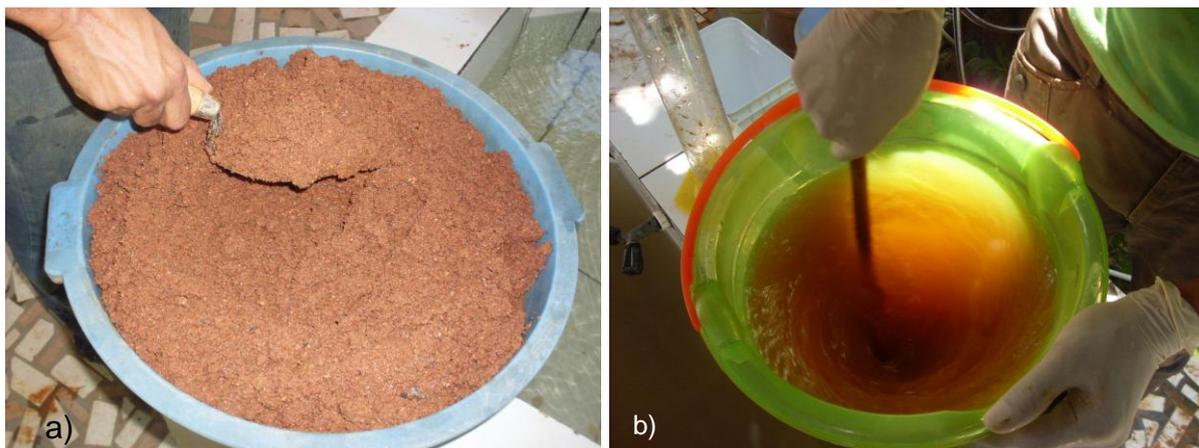


Figura 27 – Homogeneização de amostras de sedimentos (a) e do escoamento superficial (b).

Após pré-processamento e identificação, todas as amostras foram transportadas para o laboratório (LABHIDRO/UFES) onde foram guardadas em local fresco e arejado. Em laboratório, todas as amostras foram processadas conforme metodologia descrita por Carvalho *et al.* (2000). As amostras dos sedimentos provenientes do tanque de retenção foram pesadas, secadas em estufa e novamente pesadas para determinação do percentual de umidade, posteriormente foram submetidas a peneiramento.

As amostras compostas do escoamento superficial tiveram as concentrações determinadas pelo método da evaporação, devido às grandes quantidades de siltes e argilas; a quantidade de sais dissolvidos foi determinada para cada uma das amostras para corrigir a concentração; o método do tubo de retirada pela base foi utilizado para verificar a granulometria das partículas transportadas em suspensão.

4.5 Análise e tratamento de dados

Cada registro realizado pelo pluviógrafo (formato h:min:seg) era equivalente a 0,25mm de chuva. Este instrumento produziu algumas séries de registros que foram exportados para planilha de cálculo e convertidos em horas (formato decimal) para facilitar a visualização do intervalo de tempo decorrido entre dois registros consecutivos. O somatório de todos os intervalos forneceu a duração da precipitação.

O total precipitado em cada evento de chuva foi obtido através da multiplicação do número total de registros por 0,25mm; a intensidade média foi obtida através da divisão do total precipitado pela duração do evento de chuva. A Intensidade máxima média de precipitação em 30 minutos (I30) foi determinada a partir da identificação do maior número de registros ocorridos em 30 minutos em cada evento de chuva avaliado.

Para cada evento de chuva foi construído um pluviograma para identificar intervalos com intensidade aproximadamente constante (Figura 28). Realizada a identificação dos pontos de inflexão, a energia cinética e o índice de erosividade foram determinados de acordo com a metodologia proposta por Wischmeier e Smith (1978). Estimativas da erosividade mensal e anual para a bacia onde encontram-se os trechos monitorados foram obtidas através da Equação 3, proposta por Silva (2001), citado por Pruski (2009b), para a região 4.

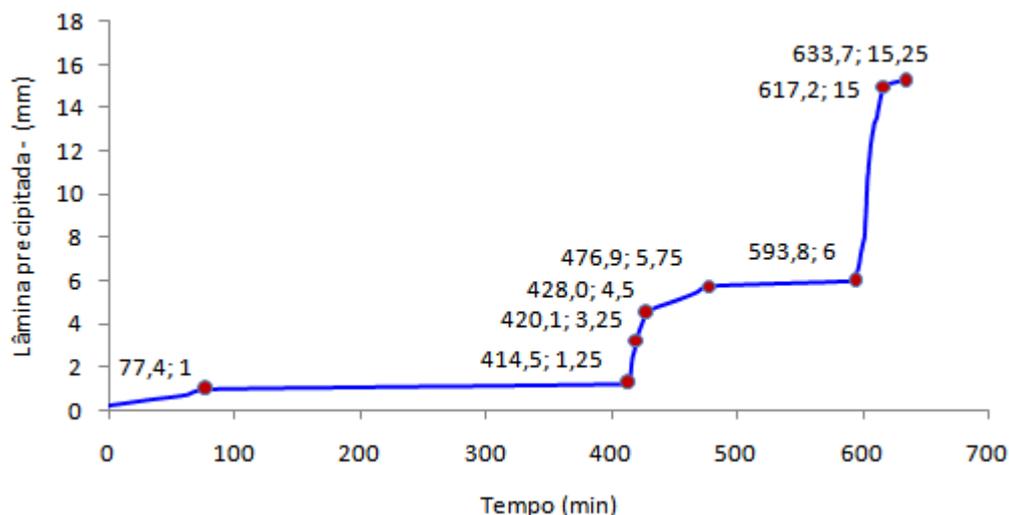


Figura 28 – Pontos de inflexão para determinação da erosividade da chuva - evento nº 13.

Os registros de tombamentos das câmaras dos medidores de fluxo foram exportados para planilha de cálculo para tratamento, cuja operação inicial foi separá-los em séries iniciadas e finalizadas dentro do respectivo evento de precipitação. Para cada medidor de fluxo, o número de tombamentos por minuto foi utilizado para, através das equações 9 ou 11, obter a vazão de escoamento superficial; para cada vazão, um volume de escoamento foi determinado através das equações 10 ou 12.

O volume de líquido contido em cada tambor foi corrigido através da subtração do volume ocupado pela massa de sedimentos; este volume de sedimentos foi obtido através da divisão da massa sedimentos pela respectiva massa específica aparente (Maior uso = $1,418 \text{ kg l}^{-1}$; Menor uso = $1,754 \text{ kg l}^{-1}$). O volume determinado através das equações 10 ou 12, acrescido do volume contido no tambor, depois de corrigido, forneceu o volume total de escoamento superficial gerado em cada evento de chuva.

Assim, os volumes de escoamento superficial produzidos em cada evento foram normalizados pela área para facilitar as análises. A partir dos registros de tombamentos dos medidores de fluxo, foi determinada a vazão máxima média em 30 minutos (Q30), obtida a partir da identificação do intervalo em que ocorreu o maior número de tombamentos das câmaras em 30 minutos. Esta variável foi utilizada, juntamente com o volume escoado, para caracterizar o escoamento superficial.

Ainda que as partículas possam experimentar diferentes modalidades de transporte, ou seja, partículas grosseiras nem sempre serão arrastadas, bem como partículas finas nem sempre serão transportadas em suspensão, para fins deste monitoramento, os sedimentos coletados no tanque de retenção foram denominados sedimentos grosseiros (SG) e os sedimentos contidos na amostra de escoamento superficial foram denominados sedimentos suspensos (SS).

Nestas condições, mesmo para eventos em que foram produzidos baixos volumes de escoamento e baixas vazões, os sedimentos retidos no tambor foram contabilizados sedimentos grosseiros. Para cada evento de chuva, a massa de sedimentos suspensos foi determinada através da multiplicação do volume escoado pela concentração da amostra composta; a massa de sedimentos grosseiros corresponde à massa determinada em campo corrigida pelo percentual de umidade.

Para ambos os casos, a massa de sedimentos grosseiros e a massa de sedimentos suspensos foram normalizados pela área e a soma destas resultou na massa total de sedimentos produzida em um evento de chuva. Os resultados obtidos através do método do tubo de retirada pela base foram lançados em planilha eletrônica para determinação da granulometria das partículas, através das Curvas de Oden (Figura 29), onde a equação da reta tangente à curva de melhor ajuste foi utilizada para determinar o percentual de partículas transportadas em suspensão.

Para as variáveis de interesse, o *Teste-t* foi aplicado aos coeficientes de correlação para, a um nível de significância (α) de 1% ou 5%, verificar a existência, ou não, de correlação linear significativa entre algumas das variáveis em estudo (LARSON; FARBER, 2007). Após aplicação dos testes, um melhor ajuste foi realizado com outros tipos de curvas – não lineares – para obter as equações que melhor descreveram matematicamente a relação entre o par de variáveis que estavam sendo analisadas.

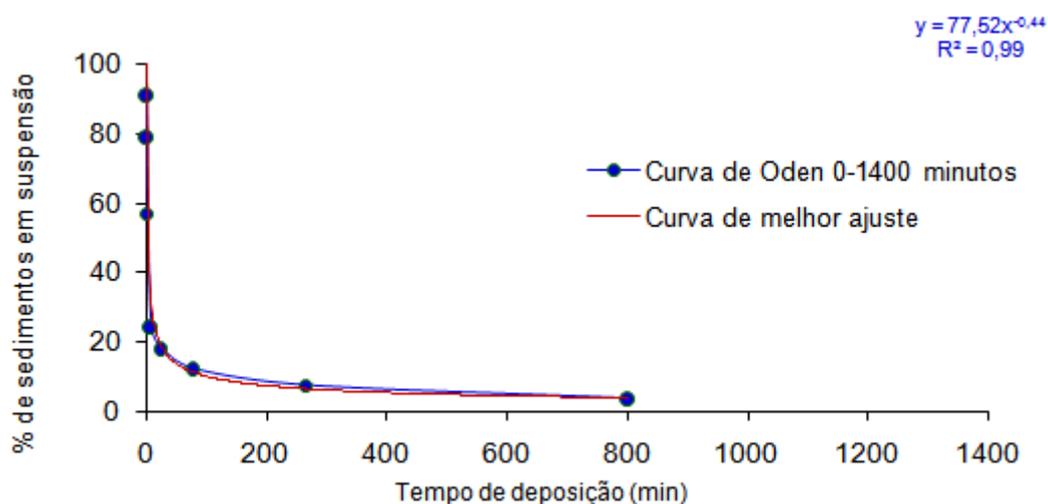


Figura 29 – Curva de Oden para o evento 7 no trecho de menor uso.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Precipitação e escoamento superficial

No período de monitoramento foram registrados 624,75 mm de chuva, distribuídos irregularmente, concentrados nos meses de novembro e janeiro (Tabela 3). Deste total, 543,8 mm foram responsáveis pela geração de escoamento superficial em pelo menos um dos trechos de estradas, no entanto, estes totais estão abaixo dos valores reais, devido à falha ocorrida no pluviógrafo que não registrou a precipitação dos eventos 20, 21 e 22 ocorridos em 30 e 31 de janeiro de 2013.

TABELA 3 - PRECIPITAÇÃO MENSAL *

Setembro 2012	Outubro 2012	Novembro 2012	Dezembro 2012	Janeiro 2013	Fevereiro 2013	Março 2013
23,75	26,00	251,00	36,25	225,25	48,50	14,00

*Valores em mm de chuva.

Além da falha ocorrida no pluviógrafo (Falha 4), ocorreram outras falhas dentre estas: falha no data logger (Falha 1), entupimento do tubo coletor do escoamento superficial (Falha 2), queda de tensão da bateria de alimentação do medidor de fluxo (Falha 3) e uma intervenção no trecho de menor uso, provocada por um pequeno corte realizado na pista de rolamento e no talude para passagem de um tubo de irrigação, que provocou alteração na concentração de sedimentos (Falha 5).

As intensidades de precipitação (I_{30}) assumiram valores de $3,5 \text{ mm h}^{-1}$ a 62 mm h^{-1} . Durante o evento 2 foi registrada a menor intensidade de precipitação ($3,5 \text{ mm h}^{-1}$) e no evento 17 foi registrada a maior intensidade (62 mm h^{-1}). Este evento foi responsável pela geração do maior índice de erosividade (Figura 30) registrado em todo o período de monitoramento ($834,50 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$). Dentre os 25 eventos de chuva (Tabela 4), nove destes ocorreram em novembro e dez em janeiro.

TABELA 4 - PRECIPITAÇÃO E ESCOAMENTO SUPERFICIAL POR EVENTO DE CHUVA

EVENTO DE CHUVA	DATA (Início da precipitação)	Total precipitado (mm)	Duração (h)	I30 (mm h ⁻¹)	EI30 (MJ ha ⁻¹ mm h ⁻¹)	Trecho de menor uso				Trecho de maior uso			
						Escoamento (l m ⁻²)	Q30 (l s ⁻¹)	Q máx. (l s ⁻¹)	Coefficiente de Escoamento	Escoamento (l m ⁻²)	Q30 (l s ⁻¹)	Q máx. (l s ⁻¹)	Coefficiente de Escoamento
1	26/09/12	24,75	7,6	9,5	37,50	0,5	0,07	0,17	0,02	2,1	0,4	0,99	0,08
2	09/10/12	4,00	5,0	3,5	2,80	0,0	0,00	0,00	0,00	0,03	---	---	0,01
3	08/11/12	30,75	12,0	11,0	59,00	0,0	---	---	0,00	1,7	0,4	1,79	0,06
4	09/11/12	50,75	47,1	10,5	65,60	0,6	0,08	0,34	0,01	Falha ¹	Falha ¹	Falha ¹	Falha ¹
5	13/11/12	39,50	6,4	31,5	263,00	2,1	0,41	1,30	0,05	12,1	3,1	5,98	0,31
6	15/11/12	22,00	7,2	17,0	40,50	1,5	0,23	0,82	0,07	6,0	1,1	3,24	0,27
7	16/11/12	15,25	5,2	9,0	26,30	1,9	0,47	0,65	0,12	4,7	1,1	1,47	0,31
8	25/11/12	29,25	17,9	7,5	33,10	0,8	0,10	0,34	0,03	4,8	0,74	0,99	0,16
9	26/11/12	17,00	18,4	6,5	17,20	0,6	0,01	0,18	0,03	4,1	0,58	1,15	0,24
10	27/11/12	10,75	28,6	6,0	8,10	0,2	---	---	0,02	1,7	0,55	0,83	0,16
11	30/11/12	28,25	16,4	9,0	41,90	2,6	0,26	0,26	0,09	8,1	0,83	1,31	0,29
12	01/12/12	24,30	2,8	39,0	227,60	9,2	3,69	5,02	0,38	Falha ²	Falha ²	Falha ²	Falha ²
13	12/01/13	17,25	19,9	18,5	57,70	0,8	0,25	0,99	0,05	Falha ³	Falha ³	Falha ³	Falha ³
14	17/01/13	22,50	8,9	8,0	30,00	Falha ³	Falha ³	Falha ³	Falha ³	Falha ³	Falha ³	Falha ³	Falha ³
15	18/01/13	9,00	0,6	17,0	34,40	Falha ³	Falha ³	Falha ³	Falha ³	3,2	1,39	4,21	0,36
16	19/01/13	13,00	4,1	22,0	71,70	2,8	1,92	5,50	0,22	3,6	1,71	6,14	0,28
17	20/01/13	55,50	9,6	62,0	834,50	15,3	4,41	6,14	0,28	21,0	4,88	6,14	0,38
18	21/01/13	26,50	4,6	39,5	228,40	8,3	3,58	5,80	0,31	11,9	4,56	6,3	0,45
19	28/01/13	60,00	8,3	20,5	255,20	13,6	2,14	2,60	0,23	24,9	2,3	2,9	0,41
20	30/01/13	Falha ⁴	Falha ⁴	Falha ⁴	Falha ⁴	1,2	0,28	4,50	Falha ⁴	4,6	1,7	4,53	Falha ⁴
21	30/01/13	Falha ⁴	Falha ⁴	Falha ⁴	Falha ⁴	2,5	0,63	1,63	Falha ⁴	5,1	1,31	4,05	Falha ⁴
22	31/01/13	Falha ⁴	Falha ⁴	Falha ⁴	Falha ⁴	0,7	0,20	0,98	Falha ⁴	2,1	0,94	3,56	Falha ⁴
23	07/02/13	4,50	2,6	7,5	6,20	0,0	0,00	0,00	0,00	0,1	---	---	0,01
24	27/02/13	26,75	9,8	23	115,10	Falha ¹	Falha ¹	Falha ¹	Falha ¹	6,7	3,17	5,17	0,25
25	02/03/13	12,25	6,1	18,5	47,20	Falha ¹	Falha ¹	Falha ¹	Falha ¹	3,1	1,42	4,21	0,25

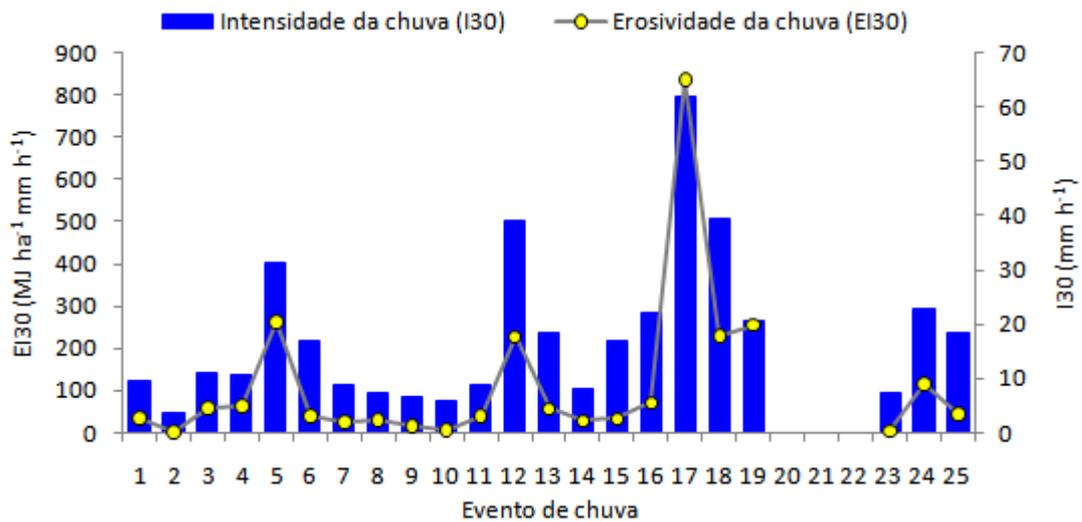


Figura 30 – Erosividade e intensidade da chuva.

Os eventos 2 ($3,5 \text{ mm h}^{-1}$) e 23 ($7,5 \text{ mm h}^{-1}$) produziram escoamento superficial somente no trecho de maior uso e nenhum evento gerou escoamento apenas no trecho de menor uso. Os eventos 8, 9 e 10, apesar de apresentarem intensidade igual ou inferior a $7,5 \text{ mm h}^{-1}$, produziram escoamento no trecho de menor uso. Esta resposta hidrológica permitiu constatar, tal como colocado Bertoni e Lombardi Neto (2008), que o escoamento superficial depende de vários fatores, dentre estes, das condições de umidade do solo antes da chuva e não somente da intensidade da precipitação.

Em 17 eventos de chuva no trecho de menor uso e 19 eventos no trecho de maior uso, foi possível quantificar o escoamento superficial através do medidor de fluxo (Figura 31). Nos demais eventos isso não foi possível, pois ocorreram falhas nos instrumentos de medição, bem como, em alguns casos foram gerados volumes de escoamento inferiores a 157,6l (capacidade do tambor). Foram registradas vazões (Q30) de $0,01 \text{ l s}^{-1}$ a $4,41 \text{ l s}^{-1}$ no trecho de menor uso, enquanto no trecho de maior uso estas vazões estiveram entre $0,4 \text{ l s}^{-1}$ e $4,88 \text{ l s}^{-1}$, inclusive.



Figura 31 – Medidor de fluxo em funcionamento.

As maiores vazões ($Q_{\text{máx.}}$) registradas foram $6,14 \text{ l s}^{-1}$ (Evento 17) no trecho de menor uso e $6,3 \text{ l s}^{-1}$ (Evento 18) no trecho de maior uso. O evento 17, caracterizado pela maior I30 do período de monitoramento, produziu uma vazão máxima ($Q_{\text{máx.}}$) de $6,14 \text{ l s}^{-1}$ em ambos os trechos de estradas (Figura 32). Em análise dos eventos 17 e 19 (Figuras 32 e 33) foi verificado que as vazões produzidas no trecho de maior uso foram superiores às produzidas no trecho de menor uso, praticamente durante toda a duração de um evento chuva.

Estas diferenças nas vazões estão relacionadas aos coeficientes de escoamento das parcelas experimentais. No trecho de menor uso os coeficientes alcançaram valores de 0,01 a 0,38 e no trecho de maior uso de 0,01 a 0,45. Levando-se em consideração apenas os eventos em que os coeficientes puderam ser determinados para os dois trechos de estradas, pois em alguns eventos o trecho de menor uso não gerou escoamento, o trecho de maior uso exibiu maiores coeficientes de escoamento superficial em todos os eventos de chuva (Figura 34).

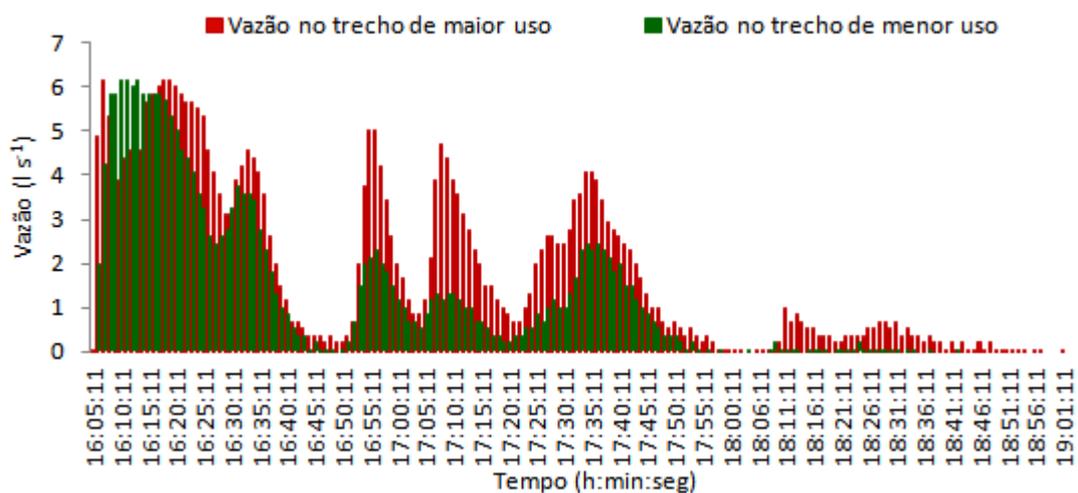


Figura 32 – Vazões registradas durante o evento 17.

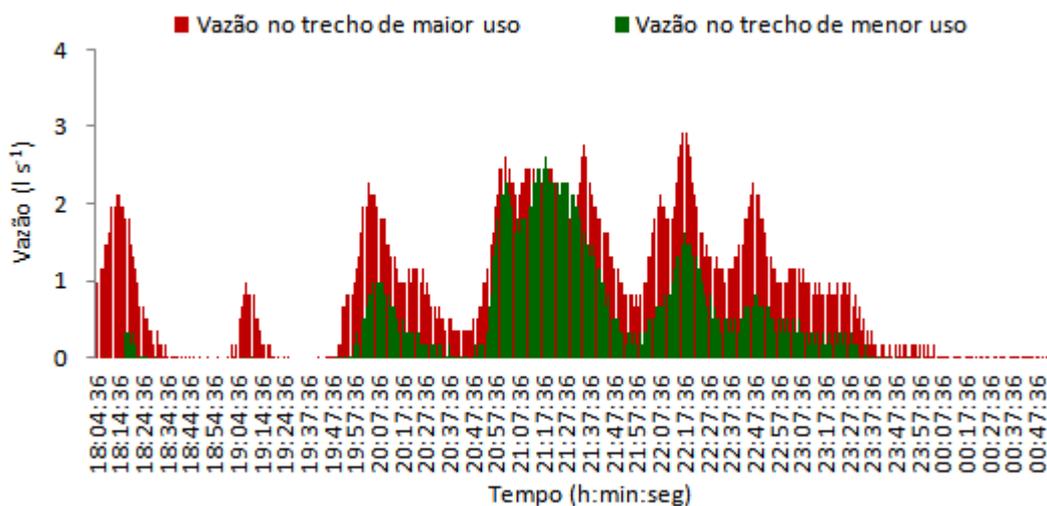


Figura 33 – Vazões registradas durante o evento 19.

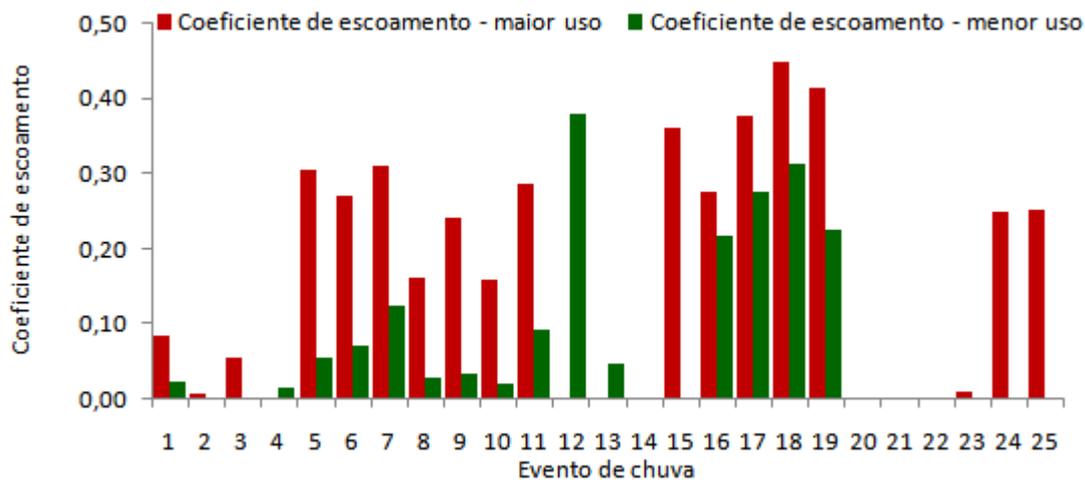


Figura 34 – Coeficiente de escoamento por evento de chuva.

Por razões que serão discutidas adiante, o trecho de maior uso apresentou maiores volumes de escoamento superficial (Figura 35), tendo sido gerados em média $6,3 \text{ l m}^{-2}$ de escoamento neste trecho, enquanto o trecho de menor uso produziu $3,1 \text{ l m}^{-2}$. Esta superioridade na condição de gerar escoamento superficial pelo trecho de maior uso foi constatada em todos os eventos avaliados. No evento 3 ocorreu a maior disparidade, pois, neste caso, o trecho de maior uso produziu $1,71 \text{ l m}^{-2}$ e o trecho de menor uso produziu apenas $0,0132 \text{ l m}^{-2}$.

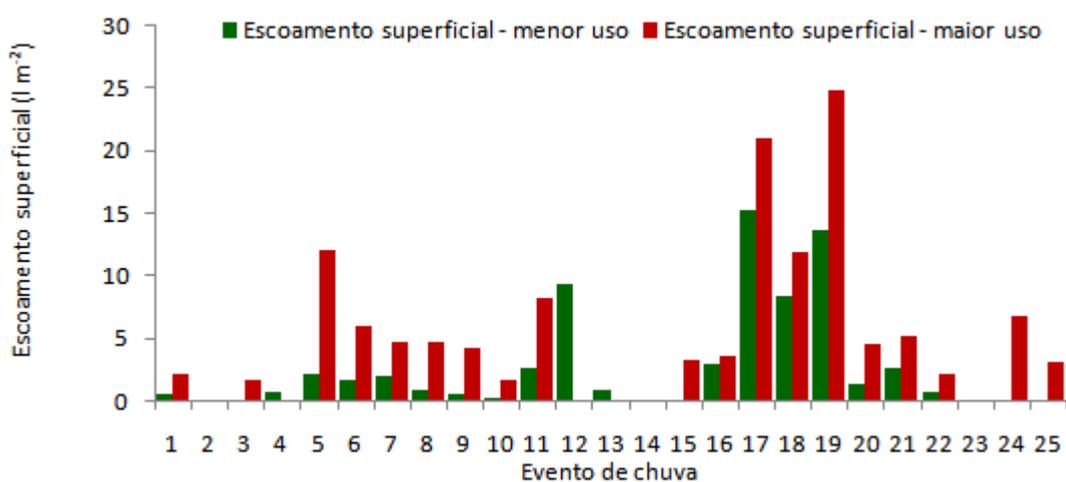


Figura 35 – Escoamento superficial por evento de chuva.

Tendo em vista que os coeficientes de escoamento expressam a razão entre o total escoado e o total precipitado e que o total escoado depende das condições de infiltração da água no solo, foi verificado que quatro fatores contribuíram para que os trechos monitorados exibissem diferentes coeficientes de escoamento: a topografia, a permeabilidade do solo, a vegetação e a resposta diferenciada de cada trecho à acréscimos na intensidade da precipitação (I30).

Quanto a topografia, uma vez que as parcelas experimentais apresentavam comprimentos semelhantes, a declividade aparece como um fator a ser considerado. O trecho de menor uso se apresentava um pouco menos inclinado que o trecho de maior uso e esta diferença, embora pequena, contribuiu para a geração de fluxos de maior velocidade neste trecho, visto que, segundo Bertoni e Lombardi Neto (2008) superfícies mais inclinadas produzem fluxos de maior velocidade o que favorece a ocorrência do escoamento superficial.

No tocante a permeabilidade, valas de drenagem e taludes constituem estruturas mais permeáveis que a pista de rolamento, visto que, por serem menos compactadas, apresentaram melhores condições de promover a infiltração da água no solo. No trecho de maior uso, 67% da área disponível para a incidência da precipitação (523m²) era ocupada pela pista de rolamento, enquanto no trecho de menor uso esta parcela correspondia a 53% (396m²). Isto significa que, no trecho de maior uso, a precipitação incidiu, em percentuais, sobre uma área menos permeável, favorecendo o escoamento superficial.

Além disso, os trechos de estradas apresentaram diferenças quanto à compactação da pista de rolamento, bem como apresentaram diferenças quanto às características dos materiais superficiais. Através de inspeção visual e cortes realizados no terreno, foi verificado que a pista de rolamento do trecho de maior uso encontrava-se mais compactada que a pista do trecho de menor uso, mesmo tendo sido submetida à manutenção em 25/07/12, data esta em que foi realizado o nivelamento da pista e lançamento de materiais sobre o leito da estrada de maior uso (Figura 36).

Embora o nivelamento tenha promovido distúrbios na camada superficial, não houve alterações na camada subjacente, mais antiga e bem compactada. Nestas condições, foi gerado um perfil formado por três camadas: 1^a camada, mais superficial, composta por agregados lançados durante a manutenção; 2^a camada, intermediária, composta por solo e diversos materiais lançados sobre a pista e compactados ao longo dos anos, principalmente pelo tráfego de veículos; 3^a camada, formada pelo solo local, suporte para a 2^a e 1^a camadas.

Nestas condições, os materiais desestruturados lançados sobre a pista de rolamento conformaram uma grande quantidade de espaços vazios que favoreceram a infiltração da água através da primeira camada. No entanto, a camada intermediária, mais compactada e menos permeável, contribuiu para a rápida saturação da 1^a camada e, conseqüentemente, surgimento do escoamento superficial. Assim, no trecho de maior uso, o comportamento da água na superfície da estrada foi uma resposta combinada destas três camadas à precipitação.



Figura 36 – Trecho de maior uso antes (a) e após (b) a manutenção.

Ao contrário, no trecho de menor uso, um eventual tráfego de veículos de pequeno porte tornou bem reduzida a necessidade de manutenção. Ainda que este tráfego associado ao selamento superficial provocado pelo impacto das gotas de chuva também tenha produzido alguma compactação dos materiais superficiais, esta pista exibiu uma condição bem mais favorável à ocorrência da infiltração, quando comparada à segunda camada do trecho de maior uso. Assim, as diferentes condições de permeabilidade do solo contribuíram para que o trecho de menor uso apresentasse uma menor geração de escoamento superficial em todos os eventos.

Embora o crescimento da vegetação não tenha sido interrompido em nenhum dos trechos avaliados, esta encontrou melhores condições de desenvolvimento no trecho de menor uso, tanto nos taludes quanto em alguns pontos da pista de rolamento. Tendo em vista que, de acordo com Azevedo Neto (1998), a vegetação interfere nos coeficientes de escoamento (AZEVEDO NETO, 1998), no trecho de menor uso esta favoreceu a infiltração da água no solo, diminuindo o escoamento superficial.

Outro fator que contribuiu para a apresentação de diferentes coeficientes de escoamento exibidos pelos dois trechos de estradas, em cada evento de chuva, foi a resposta diferenciada de cada trecho aos acréscimos na intensidade da precipitação (I30). Para melhor compreender essa influencia, torna-se necessário considerar que maiores intensidades de precipitação (I30) produziram maiores vazões (Q30) e, conseqüentemente, maiores volumes de escoamento superficial (ES) nos dois trechos de estradas monitorados, conforme ilustrado na Figura 37 e na Figura 38, respectivamente.

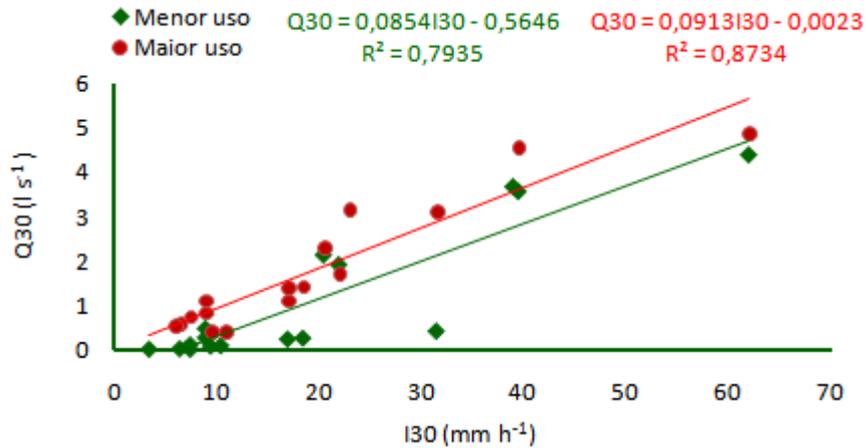


Figura 37 – Relação entre Q30 e I30

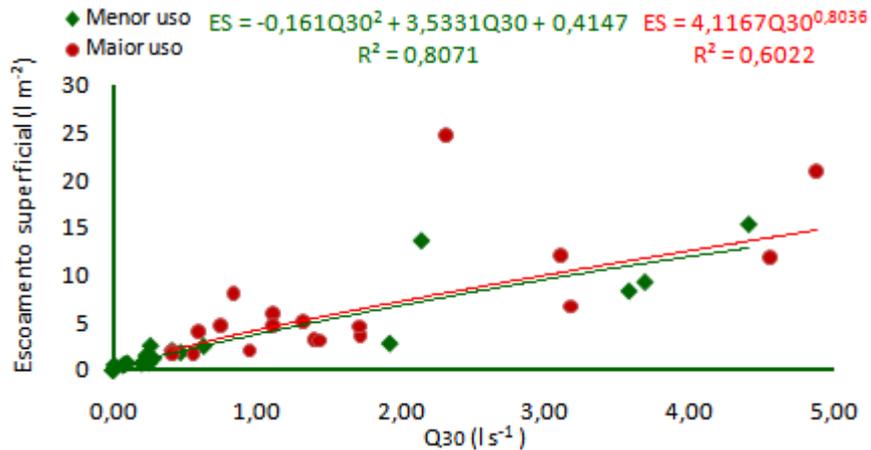


Figura 38 – Relação entre escoamento superficial e Q30.

Assim, os coeficientes de escoamento também apresentaram resposta semelhante, ou seja, se tornaram cada vez maiores na medida em que ocorreram acréscimos na intensidade da precipitação (Figura 39) e na vazão (Figura 40). No entanto, ainda que o trecho de maior uso tenha apresentado maiores coeficientes em todos os eventos de chuva, foi verificado que os dois trechos de estradas possuem uma tendência em exibir coeficientes com valores mais semelhantes diante de elevações na intensidade da precipitação. Esse comportamento pode ser observado a partir da curva de melhor ajuste obtida da relação entre a razão dos coeficientes de escoamento (C/C) com a intensidade de precipitação de cada evento (Figura 41).

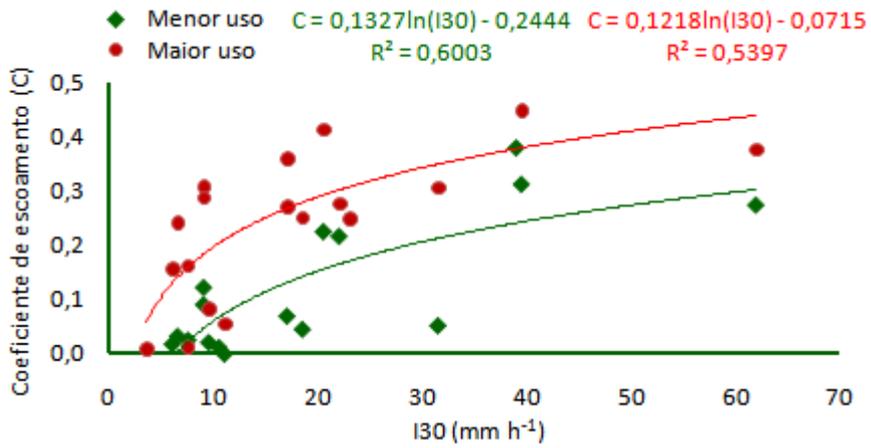


Figura 39 – Relação entre coeficiente de escoamento e I30.

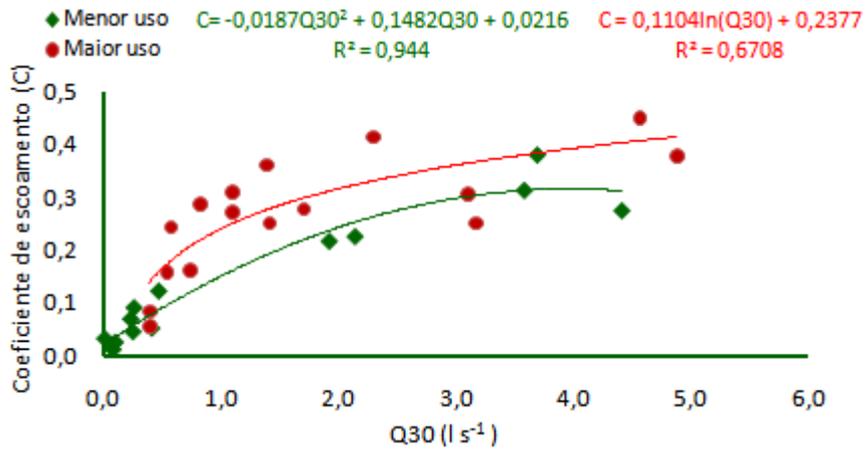


Figura 40 – Relação entre coeficiente de escoamento e Q30.

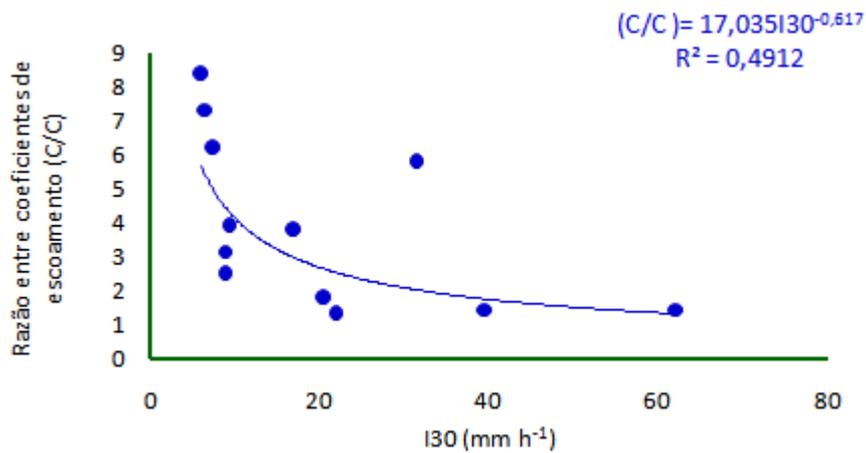


Figura 41 – Relação entre a razão dos coeficientes de escoamentos e I30.

Essa tendência a exibir coeficientes mais semelhantes ocorreu por que, de acordo com Simões e Coiado (2001), menores intensidades de precipitação facilitam a infiltração, bem como, de acordo com Pruski (2009a), as maiores taxas de precipitação podem assumir valores superiores a condutividade hidráulica do solo saturado. Nesse sentido, eventos de chuva com maiores intensidades contribuíram para que o escoamento apresentasse volumes mais semelhantes nos dois trechos.

No entanto, a Figura 41 precisa ser considerada com cautela, pois o dado referente ao evento Nº 3 (valor extremo) foi excluído, e não foi identificada correlação linear significativa para o conjunto de dados. Embora no evento 10 ($I_{30} = 6 \text{ mm h}^{-1}$) a razão entre os coeficientes tenha sido 8,4 e no evento 17 ($I_{30} = 62 \text{ mm h}^{-1}$) tenha diminuído para 1,4, apenas 49% da variação na razão entre os coeficientes de escoamento (C/C) pode ser explicada pela sua relação com a intensidade da chuva.

Na investigação da origem da Q30 foi verificado que esta nem sempre foi gerada por I_{30} . No trecho de menor uso, em 63% dos eventos, Q30 foi gerada por I_{30} e no trecho de maior uso, 71%. Isso porque, em alguns casos, Q30 foi gerada por um segundo pico de precipitação com intensidade menor que I_{30} . Segundo Wemple e Jones (2003) essas diferenças ocorrem devido a fatores relacionados às próprias chuvas, bem como à umidade do solo.

Assim, as investigações demonstraram que as diferentes condições de topografia, permeabilidade e crescimento vegetal, associadas a uma resposta diferenciada de cada trecho quando submetidos a diferentes taxas de precipitação, interferiram nos volumes de água infiltrada e escoada. Estas interferências geraram diferenças não apenas no volume escoado (Figura 42), mas também na vazão do escoamento superficial em cada trecho (Figura 43).

Macdonald *et al.* (2001) apontaram o total precipitado (T), como uma variável bem correlacionada com o volume de escoamento superficial produzido, no entanto, embora tenha sido verificada correlação linear significativa ($\alpha=0,05$) para os dois trechos de estradas avaliados nesta pesquisa, o trecho de maior uso exibiu um coeficiente de determinação mais elevado que aquele obtido para o trecho de menor uso, conforme pode ser verificado na Figura 44.

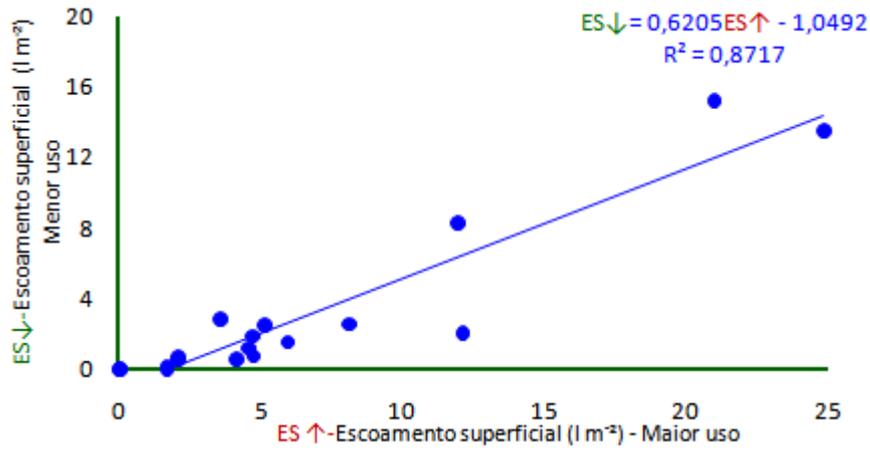


Figura 42 – Relação entre os escoamentos gerados nos trechos monitorados.

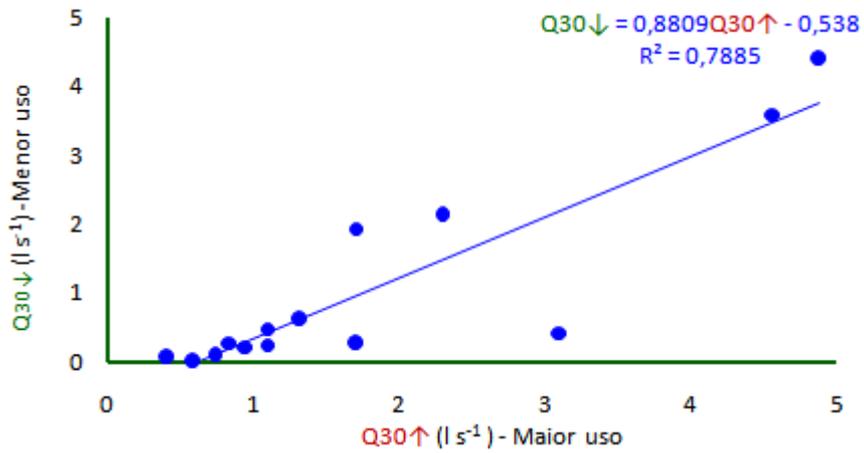


Figura 43 – Relação entre as vazões (Q30) produzidas nos trechos monitorados.

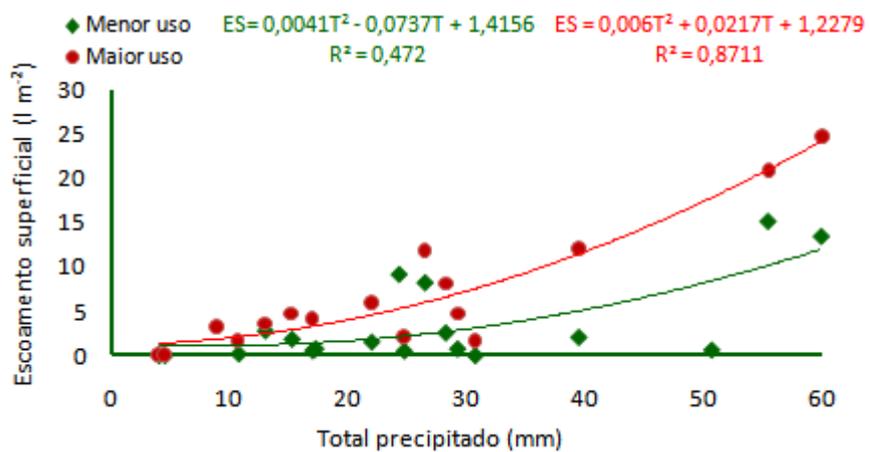


Figura 44 – Relação entre escoamento superficial e total precipitado.

Esta pior qualidade de ajustamento obtida a partir da relação entre escoamento superficial e total precipitado no trecho de menor uso, deve-se, dentre outros fatores, às condições do solo da estrada antes da ocorrência da chuva, tal como verificado no evento 3 em que o terreno não recebia qualquer precipitação a aproximadamente 30 dias, ou ainda, devido a ocorrência de um volume de precipitação mais elevado, porém ao longo de várias horas, tal como ocorrido no evento 4, em que foram precipitados 50,75mm em 47,1h.

Sobretudo, tendo em vista que os dois trechos de estradas estiveram submetidos à condições experimentais semelhantes, os diferentes ajustes das curvas expressam a forma diferenciada como os dois trechos respondem à precipitação incidente, pois o trecho de maior uso, conforme discutido anteriormente, apresenta melhores condições para a geração do escoamento superficial, mesmo quando submetido a pequenos volumes de precipitação.

A Figura 45 mostra, por exemplo, que caso os eventos 3 e 4 não tivessem ocorrido, o coeficiente de determinação do trecho de maior uso aumentaria em 4,8%, enquanto o coeficiente de determinação do trecho de menor uso apresentaria um acréscimo de 20,9%. Nesta perspectiva, foi verificado que, além de existir outros fatores que afetam a relação entre total precipitado e escoamento superficial, estes fatores podem atuar de forma diferenciada em cada trecho monitorado.

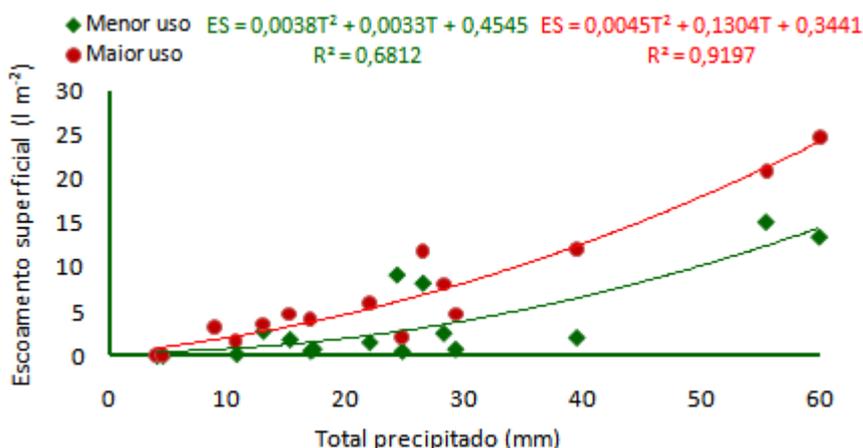


Figura 45 – Relação entre escoamento superficial e total precipitado – ajustado.

5.2 Produção de sedimentos

A produção de sedimentos foi obtida a partir dos 25 eventos de chuva (TABELA 5), dentre os quais nem todos produziram escoamento superficial em volume suficiente para ser registrado no medidor de fluxo. Assim, em 4 eventos, 2 em cada trecho, todo o escoamento foi armazenado no tanque de retenção e houve contabilização somente dos sedimentos classificados como grosseiros. As falhas tipo 1, 2, 3 e 5 não permitiram a determinação do total de sedimentos produzidos nos respectivos eventos, pois somente os sedimentos retidos no tambor puderam ser quantificados.

Em ambos os trechos monitorados a produção de sedimentos acompanhou as variações ocorridas no índice de erosividade da chuva (EI30) de cada evento (Figura 46). Regra geral, chuvas mais intensas produziram maiores quantidades de sedimentos, visto que, segundo Sugden e Woods (2007), em função de sua energia, estas possuem um maior potencial para realizar as desagregações e transporte dos materiais.

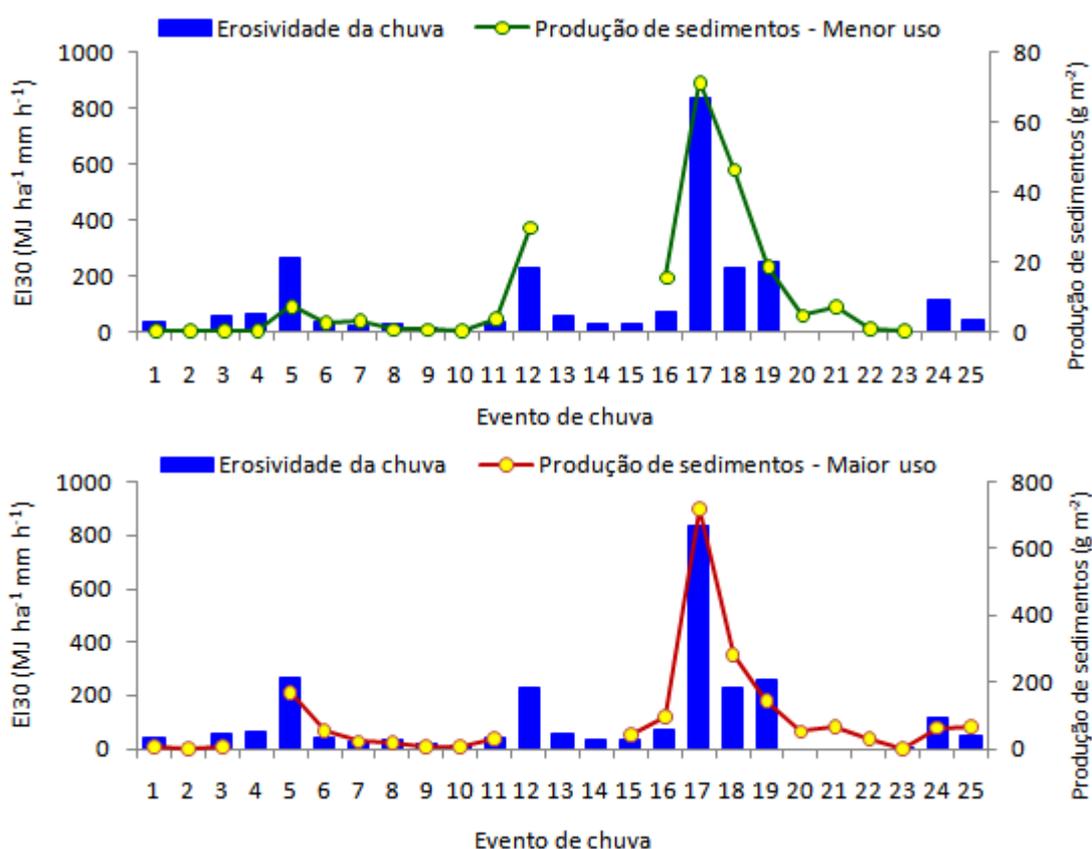


Figura 46 – Produção de sedimentos nos trechos monitorados.

TABELA 5 - PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NOS TRECHOS DE ESTRADAS MONITORADOS

EVENTO	TRECHO DE MENOR USO					TRECHO DE MAIOR USO				
	Sedimentos grosseiros (Kg)	Sedimentos Grosseiros Normalizados - SG (g m ⁻²)	Concentração (mg l ⁻¹)	Sedimentos Suspensos normalizados – SS (g m ⁻²)	Total do evento SG +SS (g m ⁻²)	Sedimentos grosseiros (Kg)	Sedimentos Grosseiros Normalizados - SG (g m ⁻²)	Concentração (mg l ⁻¹)	Sedimentos Suspensos normalizados – SS (g m ⁻²)	Total do evento SG +SS (g m ⁻²)
1	0,09	0,12	213,6	0,12	0,23	2,11	2,5	1786,6	3,73	6,21
2	0,00	0,00	----	0,00	0,00	0,03	0,0	----	----	0,03
3	0,03	0,04	----	----	0,04	3,63	4,3	2014,5	3,44	7,71
4	0,01	0,01	25,0	0,02	0,03	2,99	3,5	1963,0	Falha ¹	Falha ¹
5	4,19	5,28	901,0	1,88	7,17	27,22	32,0	11154,0	135,13	167,17
6	1,27	1,61	417,0	0,65	2,25	19,94	23,5	5392,0	32,14	55,60
7	1,78	2,25	351,0	0,66	2,91	7,02	8,3	3024,0	14,30	22,57
8	0,25	0,31	132,0	0,10	0,41	5,64	6,6	2670,0	12,70	19,34
9	0,25	0,32	2,0	0,00	0,32	2,08	2,4	1179,0	4,87	7,31
10	0,02	0,03	----	----	0,03	0,76	0,9	2364,0	4,02	4,92
11	2,44	3,08	133,0	0,35	3,43	7,97	9,4	2421,0	19,71	29,10
12	15,60	19,69	1093,0	10,10	29,80	Falha ²	Falha ²	Falha ²	Falha ²	Falha ²
13	3,23	4,08	Falha ⁵	Falha ⁵	Falha ⁵	14,81	17,4	12116,0	Falha ³	Falha ³
14	0,57	0,72	176,0	Falha ³	Falha ³	11,22	13,2	3316,0	Falha ³	Falha ³
15	4,52	5,71	710,0	Falha ³	Falha ³	18,91	22,3	6858,0	22,25	44,50
16	9,20	11,61	1342,0	3,79	15,41	35,13	41,3	15240,0	54,96	96,30
17	34,22	43,21	1862,0	28,44	71,65	187,83	221,1	23685,0	496,67	717,75
18	30,02	37,90	1042,0	8,65	46,56	126,12	148,4	11280,1	134,65	283,08
19	12,47	15,74	208,0	2,82	18,57	40,67	47,9	3923,0	97,48	145,34
20	3,44	4,34	126,0	0,16	4,49	25,10	29,5	4901,0	22,54	52,09
21	4,42	5,58	591,0	1,50	7,09	20,91	24,6	7837,0	40,17	64,78
22	0,50	0,63	247,0	0,18	0,81	15,02	17,7	6019,0	12,52	30,19
23	0,00	0,00	----	0,00	0,00	0,26	0,3	----	----	0,30
24	1,16	1,46	248,0	Falha ¹	Falha ¹	14,39	16,9	6840	45,88	62,82
25	0,69	0,87	274,0	Falha ¹	Falha ¹	11,26	13,3	17857,0	55,00	68,25

A relação entre a produção de sedimentos (P) e os índices de erosividade (EI30) apontou a existência de correlação significativa ($\alpha=0,01$) nos dois trechos de estradas (Figura 47), tendo sido identificado que, nas condições desta pesquisa, estes índices constituem uma das melhores relações estimar a produção de sedimentos, conforme apontado por Bertoni e Lombardi Neto (2008). A correlação linear da produção de sedimentos com o total precipitado (Figura 48) para o trecho de maior uso, não foi tão boa quanto aquela obtida com a erosividade da chuva. No trecho de menor uso nem mesmo foi constatada correlação significativa ($\alpha=0,05$).

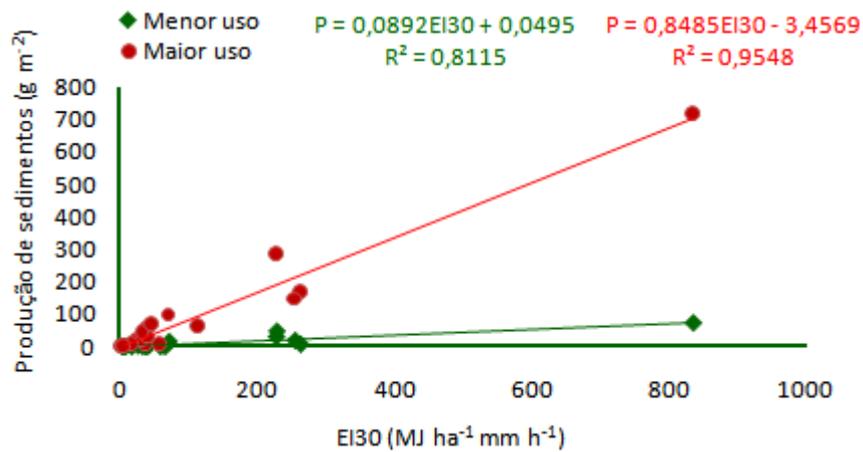


Figura 47 – Relação entre produção de sedimentos e erosividade da chuva.

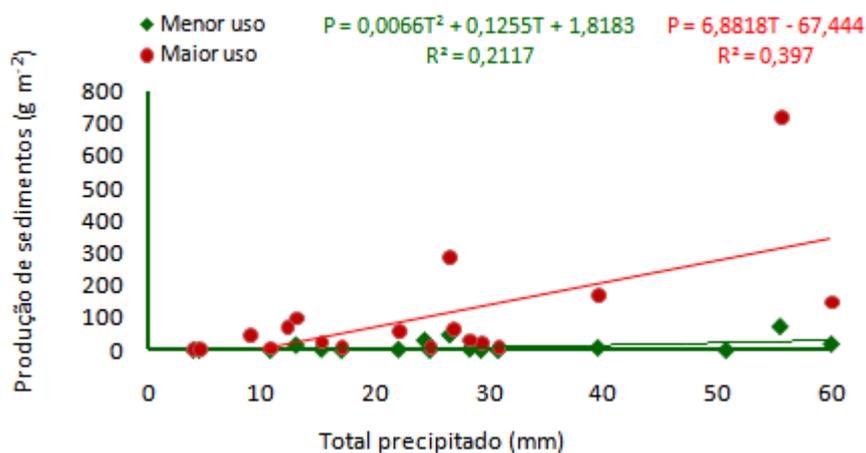


Figura 48 – Relação entre produção de sedimentos e total precipitado.

A inexistência desta correlação no trecho de menor uso também foi influenciada pelas condições do solo antes da chuva e das características da precipitação. Tal como discutido anteriormente, caso os eventos 3 e 4 não tivessem ocorrido, uma correlação linear significativa entre produção de sedimentos e total precipitado também teria sido constatada no trecho de menor uso ($\alpha=0,05$). Ainda assim, os coeficientes de determinação permaneceriam baixos para ambos os trechos (Figura 49), indicando a dominância de outros fatores, que ainda serão discutidos.

Neste aspecto, quanto a correlação entre total precipitado e produção de sedimentos, Sugden e Woods (2007) informam que, de modo geral, a precipitação total não apresenta boa correlação com a produção de sedimentos e, em alguns estudos, a boa correlação provavelmente se deve a precipitações de elevadas intensidades, produzidas por eventos convectivos, que fornecem maiores índices de erosividades associados com o total precipitado.

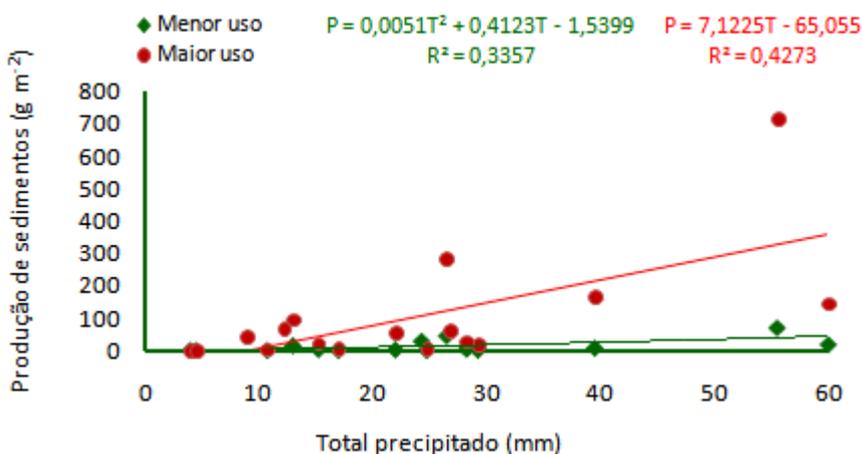


Figura 49 – Relação entre produção de sedimentos e total precipitado – ajustado.

Dentre os 25 eventos avaliados, o evento 17 apresentou a maior produção de sedimentos, pois gerou 56,8kg (71,65 g m⁻²) de sedimentos no trecho de menor uso e 609,8kg (717,75 g m⁻²) no trecho de maior uso. No trecho de menor uso, os eventos 2 (I30 = 3,5 mm h⁻¹) e 23 (I30 = 7,5 mm h⁻¹) não geraram escoamento superficial, conseqüentemente, não foram produzidos sedimentos nestes eventos. No trecho de maior uso a menor produção de sedimentos foi 0,03 kg, registrada no evento 2.

O trecho de menor uso apresentou uma produção média de sedimentos de $9,7 \text{ g m}^{-2}$ enquanto o trecho de maior uso uma produção de $93,3 \text{ g m}^{-2}$, ou seja, a produção no trecho de maior uso foi, em média, quase 10 vezes maior que produção registrada no trecho de menor uso. Para todos os eventos em que a produção de sedimentos grosseiros e finos foi avaliada nos dois trechos monitorados, a produção no trecho de maior uso foi superior a produção do trecho de menor uso.

Conforme verificado, para os dois trechos de estradas monitorados, o aumento da produção de sedimentos esteve relacionado com acréscimos na erosividade da chuva, mas somente as alterações nesta variável não justificariam as diferentes taxas de liberação de sedimentos observadas entre os dois trechos, visto que, nas condições apresentadas na Figura 47, o trecho de maior uso apresenta uma taxa de liberação equivalente a $0,84 \text{ g m}^{-2}$ a cada $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$, enquanto a taxa do trecho de menor uso é de apenas $0,08 \text{ g m}^{-2}$ a cada $\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$.

Assim, uma vez que as grandes diferenças entre os dois trechos não podem ser explicadas apenas pelos aumentos nos índices de erosividade da chuva, foi verificado que estas diferenças também são controladas por fatores intrínsecos a cada trecho. Estes fatores são, especificamente, as vazões de escoamento superficial estabelecidas em cada trecho, a presença de vegetação, os materiais lançados sobre a pista de rolamento do trecho de maior uso e a drenagem inadequada desta pista.

No trecho de maior uso, tanto as vazões médias (Q30) quanto as vazões máximas (Qmáx.) foram superiores àquelas manifestadas no trecho de menor uso (Figuras 50 e 51), salvo nos eventos 16 e 17 em que Q30 foi superada e Qmáx. foi igualada, respectivamente. As maiores vazões, produzidas por vários fatores que foram discutidos anteriormente, contribuíram que este trecho apresentasse uma maior produção de sedimentos, visto que, de acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2008), acréscimos nas vazões de escoamento levam ao transporte de uma maior quantidade de partículas de solo.

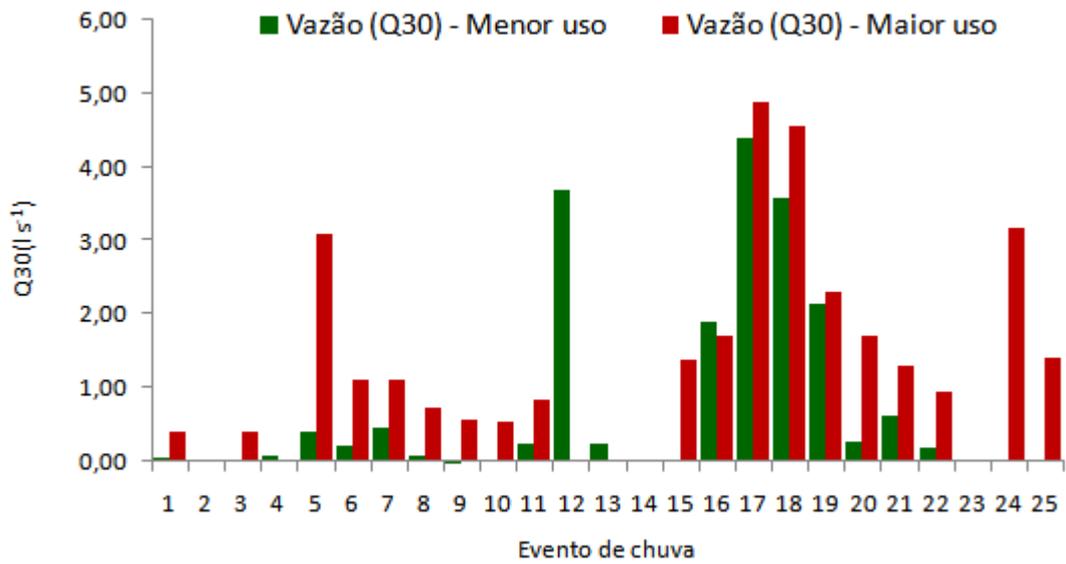


Figura 50 – Vazão de escoamento superficial (Q30) por evento de chuva.

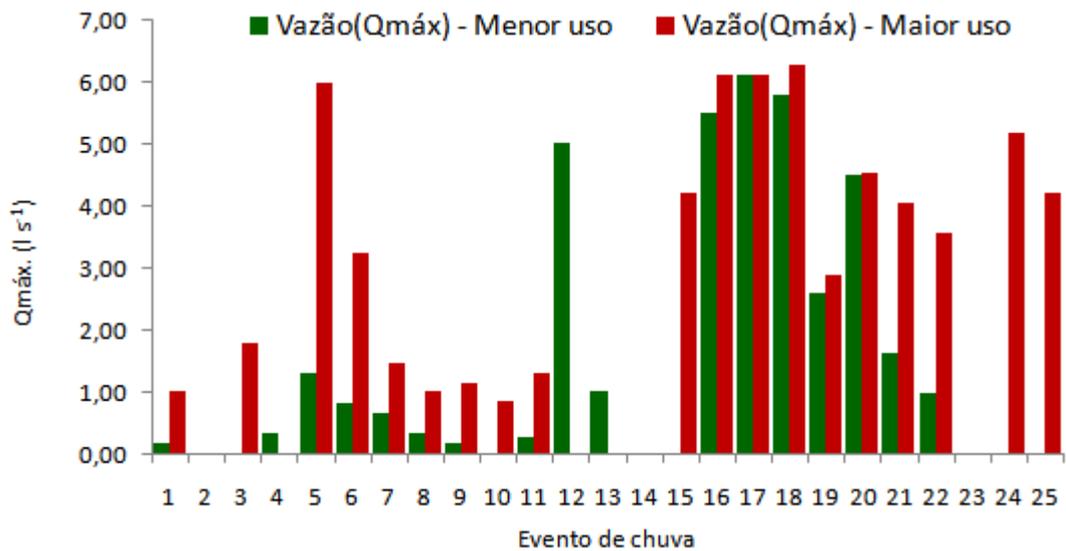


Figura 51 – Vazão de escoamento superficial (Qmáx) por evento de chuva.

Assim, tendo em vista que escoamentos com maiores vazões produzem tensões de cisalhamento mais elevadas (PRUSKI, 2009b; SIMÕES; COIADO, 2001), os fluxos gerados no trecho de maior uso, mais inclinado, apresentaram melhores condições para desagregar e transportar os materiais superficiais, tal como pode ser verificado através das Figuras 52 e 53. Para ambos os trechos, a relação entre a produção de sedimentos e a vazão média (Q30), bem como a relação entre produção de sedimentos e o volume de escoamento superficial, além de apresentarem correlação significativa ($\alpha=0,01$), apresentaram coeficientes de determinação bem semelhantes.

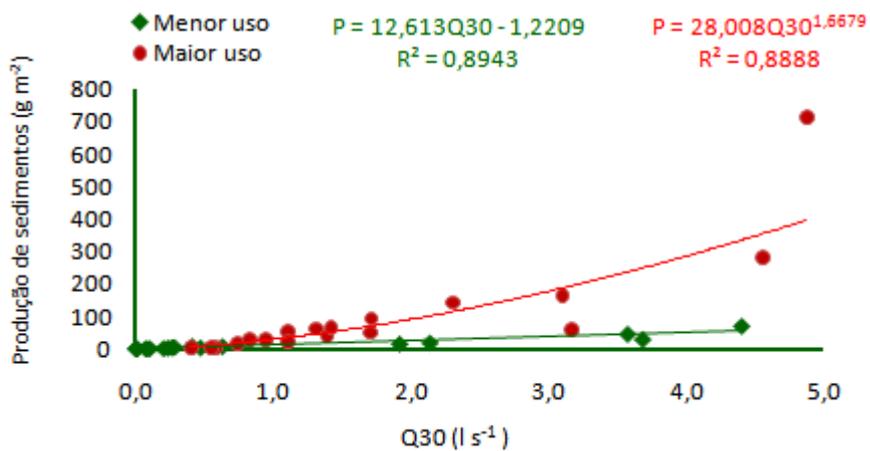


Figura 52 – Relação entre produção de sedimentos e Q30.

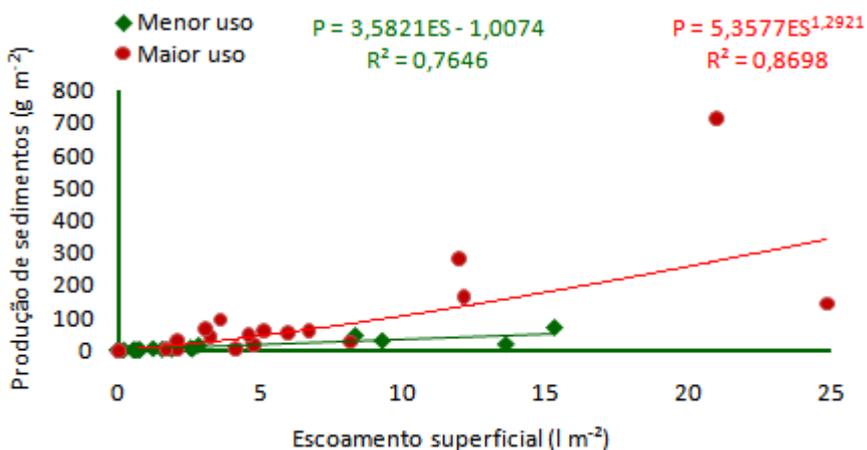


Figura 53 – Relação entre produção de sedimentos e escoamento superficial.

A análise da curva de melhor ajuste obtida através da correlação entre Q30 e a produção de sedimentos demonstrou, por exemplo, que a partir de $1,5 \text{ l s}^{-1}$, aproximadamente, a taxa de liberação de sedimentos em cada parcela experimental assume valores bem distintos (Figura 52). Estas observações indicaram que outros fatores estiveram contribuindo com essas grandes diferenças na produção de sedimentos.

No trecho de menor uso não foi verificado qualquer indício de lançamento de materiais sobre a pista de rolamento e, apesar do talude ter contribuído mais ativamente para produção de sedimentos em alguns pontos, as partículas geradas, em geral, ficaram depositadas em sua base, favorecendo o crescimento da vegetação (Figura 54a). Nestas condições as partículas ficaram mais protegidas do efeito erosivo das chuvas e do escoamento superficial, quando comparado ao trecho de maior uso (Figura 54b) tendo em vista que, de acordo com Pruski (2009b), a vegetação aumenta a rugosidade da superfície e diminui a tensão de cisalhamento.



Figura 54 – Crescimento da vegetação – trechos de menor (a) e maior uso (b).

De fato, no trecho de menor uso, a vegetação gerou no talude e na pista de rolamento uma série de obstáculos ao escoamento superficial, diminuindo sua velocidade e, portanto, dissipando a energia do escoamento. Assim, uma vez que, segundo Bertoni e Lombardi Neto (2008), as tensões cisalhantes são dependentes, dentre outros fatores, da velocidade com que o escoamento se processa no terreno, o aumento da rugosidade provocada pela vegetação gerou neste trecho condições menos favoráveis à desagregação e ao transporte das partículas de solo.

Inversamente, no trecho de maior uso, a manutenção, além de provocar distúrbios sobre a superfície de rolamento pela ação de nivelamento, lançou sobre esta uma grande quantidade de materiais. Uma vez que esses materiais não foram submetidos à compactação, não houve adesão das partículas à superfície existente (2ª camada), bem como não foi gerada adesão entre partículas. Neste trecho, o crescimento da vegetação não foi favorecido e os veículos que, segundo Sheridan *et al.* (2006), comumente realizam a desagregação dos materiais da pista de rolamento, contribuíram para gerar alguma coesão destes materiais.

Os materiais lançados sobre o trecho de maior uso apresentavam grande variação textural, incluindo cascalhos, porém de baixa resistência, e que se desagregavam mediante pequenos esforços. Neste aspecto, Sugden e Woods (2007) apontaram que a produção de sedimentos obedece a uma correlação inversa com a quantidade de materiais grosseiros existentes na superfície das estradas, no entanto, foi percebido que, conforme indicado por Burroughs e King (1989), estes materiais precisam ser de boa qualidade para que as estradas apresentem esta resposta.

Diante do arranjo de camadas existentes no leito da estrada, a água inicialmente precipitada era absorvida pela camada de solo mais superficial e permeável, mas a incapacidade de infiltrar da mesma forma na camada subjacente contribuía para o aparecimento de fluxos na superfície. Esses fluxos produziram pequenos sulcos onde as partículas de solo ofereceram menor resistência ao escoamento. Estes sulcos concentraram os fluxos superficiais (Figura 55a), aumentaram de tamanho e captaram volumes cada vez maiores.

As inversões no sentido da drenagem da pista de rolamento fizeram com que ora escoamento fosse direcionado para base do talude, ora fosse direcionado para fora da estrada. Nestas mudanças de direção, os fluxos superficiais foram captados pelos sulcos naturalmente produzidos ou gerados pelos pneus dos veículos (Figura 55b). Onde o escoamento era direcionado para a base do talude, apesar de se aproximar da vala de drenagem, algumas obstruções o impediam de alcançá-la, forçando escoamento através de novos caminhos. A permanência destes fluxos sobre a pista de rolamento, devido à drenagem inadequada, também contribuíram para uma maior produção de sedimentos no trecho de maior uso.



Figura 55 – Concentração de fluxos (a) e abertura de sulcos (b).

Nestas condições, a camada superficial de solo foi aos poucos retirada e a 2ª camada continuamente exposta. O escoamento superficial encontrou condições para ficar concentrado em certo trecho da pista de rolamento, desenvolver a erosão em sulcos e acelerar a desagregação e o transporte de sedimentos. No trecho de menor uso, ainda que não existisse uma vala de drenagem geometricamente definida, todo o escoamento era direcionado para base do talude, o que não permitiu a concentração do escoamento sobre a pista de rolamento.

Todos os fatores discutidos acima, em conjunto, contribuíram para que o trecho de maior uso produzisse uma maior quantidade de sedimentos. Uma análise mais detalhada permitiu verificar que os dois trechos monitorados apresentaram diferenças não somente nas quantidades produzidas, mas também na textura dos materiais transportados. Neste aspecto, no trecho de maior uso, a produção de sedimentos foi predominantemente composta por partículas transportadas em suspensão (Figura 56) e, em média, foram gerados $29,5 \text{ g m}^{-2}$ e $63,80 \text{ g m}^{-2}$ de sedimentos grosseiros e finos, respectivamente.

Inversamente, no trecho de menor uso, em quase todos os eventos foi gerada uma carga de sedimentos grosseiros maior que a carga de sedimentos transportados em suspensão (Figura 57), tendo sido produzidos em média $6,6 \text{ g m}^{-2}$ de sedimentos grosseiros e $3,13 \text{ g m}^{-2}$ sedimentos suspensos. Assim, foi verificado que no trecho de maior uso a carga de sedimentos suspensos correspondeu, em média, a 68% da carga total de sedimentos produzidos, enquanto no trecho de menor uso, em média, estas partículas correspondem a 32%.

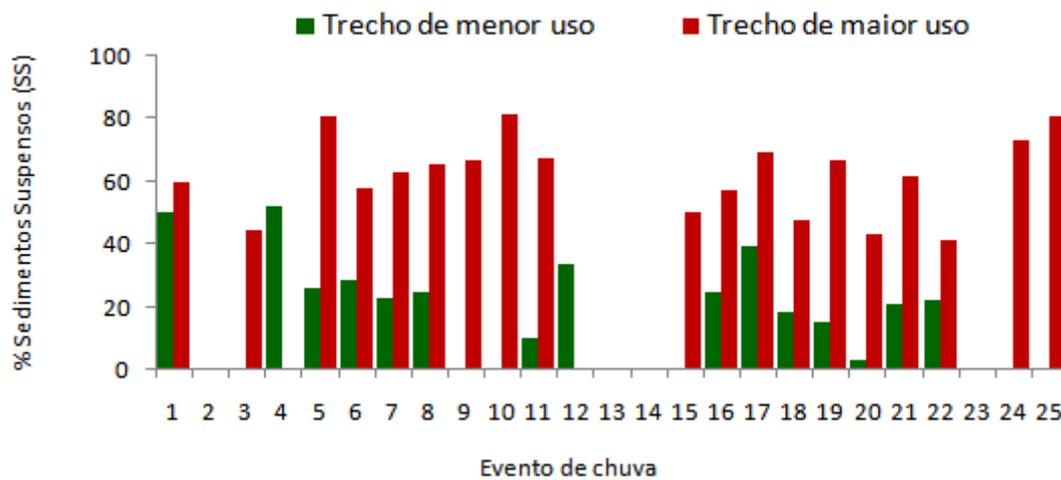


Figura 56 – Percentual de sedimentos em suspensão por evento de chuva.

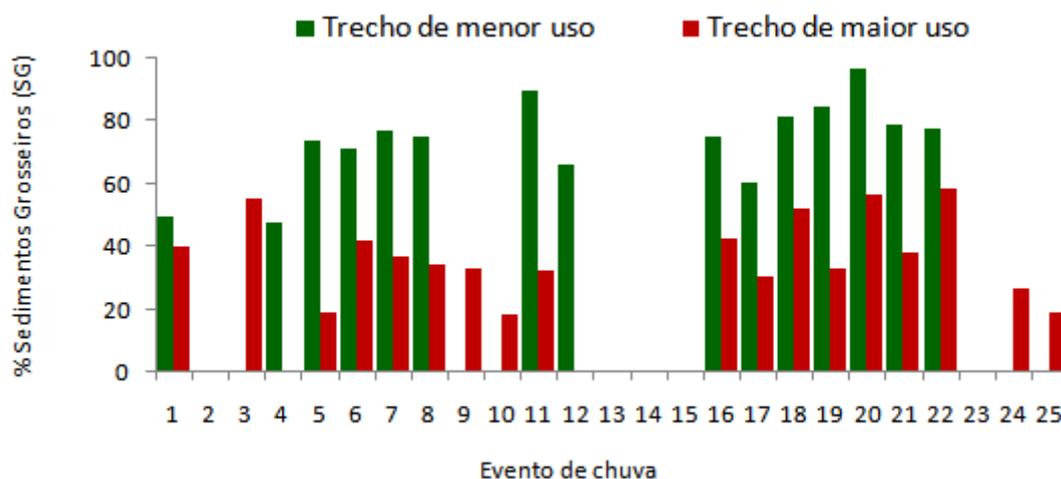


Figura 57 – Percentual de sedimentos grosseiros por evento de chuva.

Para os dois trechos de estradas monitorados, a produção de sedimentos grosseiros e sedimentos suspensos esteve bem correlacionada com a erosividade da chuva (EI30) e com a vazão (Q30), mas o trecho de maior uso apresentou taxas de produção bem mais elevadas (Figura 58 e 59). Estas diferentes taxas de liberação de partículas apontaram principalmente para o fato de que, como discutido anteriormente, o trecho de maior uso foi submetido à manutenção caracterizada pelo lançamento de materiais sobre o a pista de rolamento após o nivelamento.

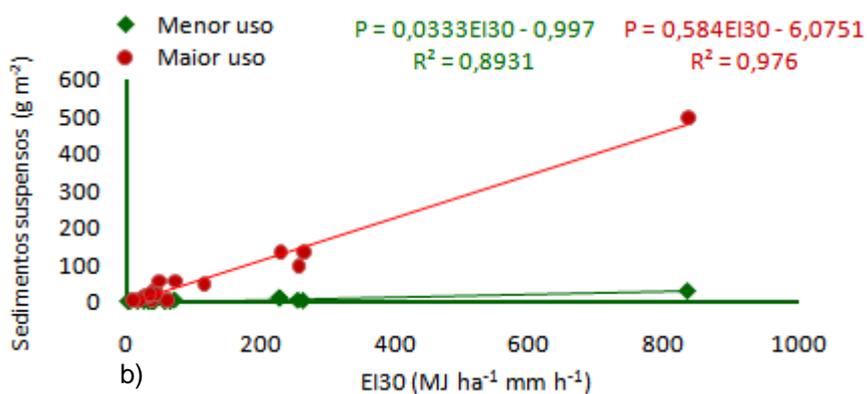
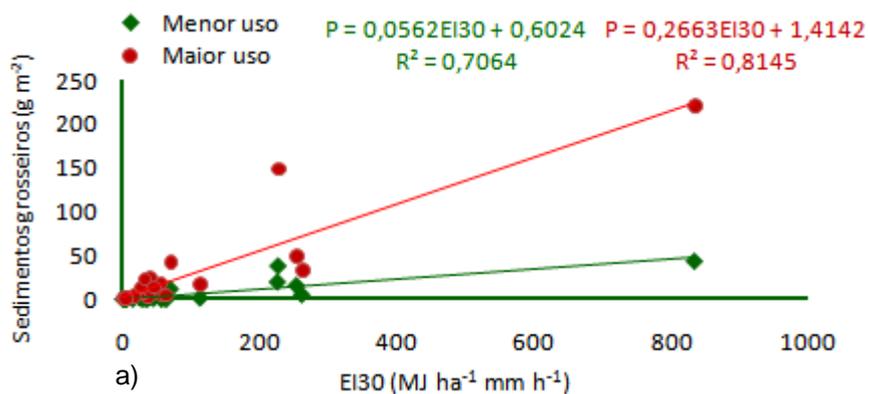


Figura 58 – Relação entre produção de sedimentos grosseiros (a) e suspensos (b) com EI30.

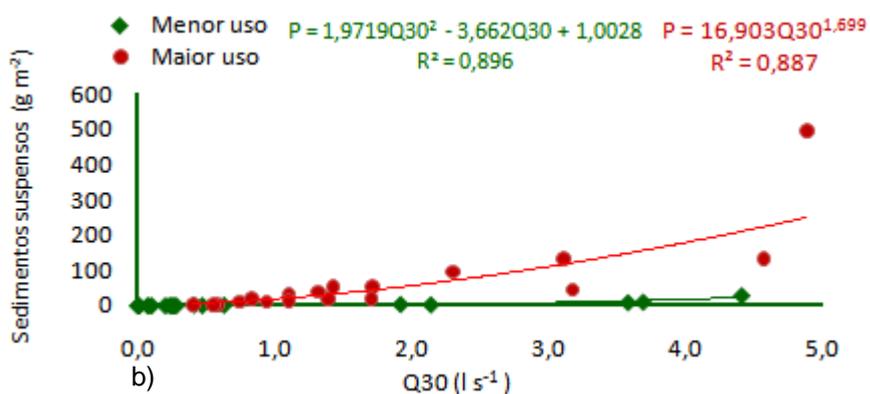
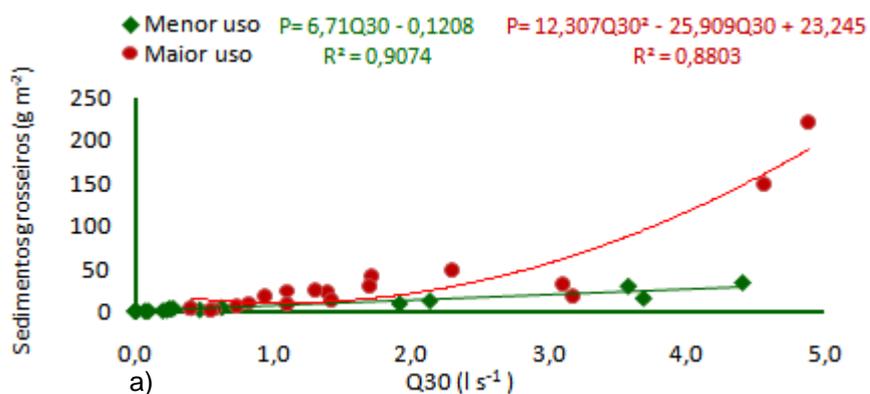


Figura 59 – Relação entre produção de sedimentos grosseiros (a) e suspensos (b) com Q30.

A análise granulométrica dos materiais superficiais dos trechos de estradas monitorados (Figura 60) indicou um D50 de 0,83 mm para os sedimentos do trecho de maior uso e 0,4mm para o D50 das partículas do trecho de menor uso. Estes resultados indicavam que, em termos granulométricos, as partículas do trecho de menor uso eram mais finas, portanto, segundo Gomi, Moore e Hassan (2005), estariam mais suscetíveis a experimentarem o transporte em suspensão.

Todavia, este não foi o comportamento observado durante o monitoramento, visto que, conforme discutido anteriormente, a massa de sedimentos transportados em suspensão foi dominante apenas no trecho de maior uso. Isso ocorreu porque, no trecho de menor uso, a amostra coletada na superfície da estrada era representativa de uma fina lâmina de sedimentos existentes sobre a pista de rolamento, porém esta amostra não refletia o arranjo estrutural do solo local.

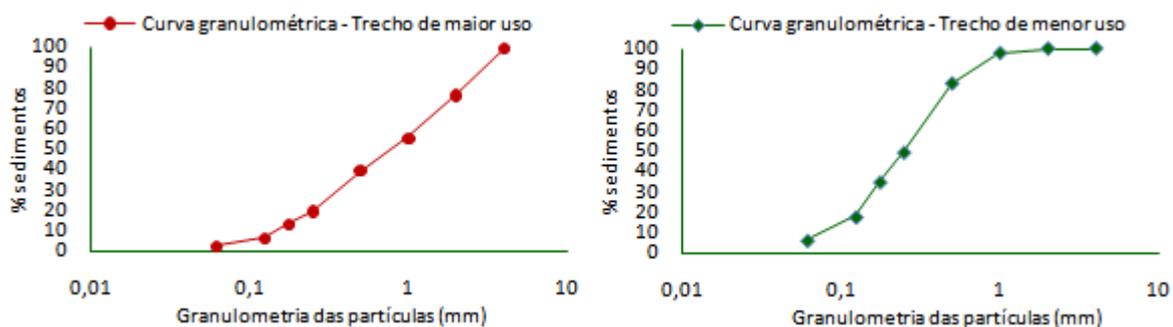


Figura 60 – Granulometria dos materiais superficiais dos trechos monitorados.

Embora as partículas fossem de granulometria mais fina, estas se encontravam arranjadas de modo a formarem uma estrutura que conferia ao solo uma maior coesão e dificultava a sua desagregação (REZENDE, *et al.*, 2007; BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008). Inversamente, o trecho de maior uso estava coberto por uma camada de materiais desestruturados, com baixa coesão, de forma a disponibilizar uma maior quantidade de sedimentos finos, capazes de ficarem em suspensão por mais tempo (OLIVEIRA *et al.*, 2005) e gerar elevadas concentrações.

Nestas condições, em alguns eventos, foi produzida uma massa de sedimentos predominantemente de finos (Figura 61) que ficaram alojados no tambor de retenção e que, devido às condições previamente definidas para o monitoramento, foram contabilizadas como sedimentos grosseiros. O fato de não terem sido transportadas com o escoamento superficial através do medidor de fluxo, indicou que, de acordo com Pruski (2009a), a capacidade de transporte do escoamento havia sido excedida, levando estas partículas a ficarem depositadas no tanque de retenção.



Figura 61 – Sedimentos retidos no tambor após secagem em estufa.

No trecho de maior uso as concentrações alcançaram valores de 1179 mg l⁻¹ a 23685 mg l⁻¹ e no trecho de menor uso valores de 2 mg l⁻¹ a 1862 mg l⁻¹. A concentração média no trecho de maior uso foi 6993 mg l⁻¹, 13 vezes superior a do trecho de menor uso (505 mg l⁻¹). Para os dois trechos as concentrações apresentaram correlação significativa ($\alpha=0,05$) com EI30 e com Q30, tendo a relação com Q30 apresentado os melhores coeficientes de determinação (Figura 62).

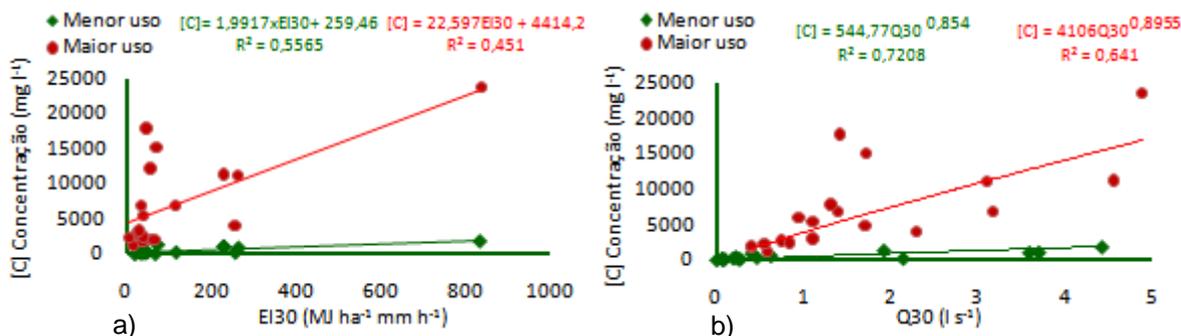


Figura 62 – Relação entre concentração de sedimentos com EI30 (a) e com Q30 (b).

As análises demonstraram também que o aumento da EI30 provocou modificações na textura dos materiais transportados em suspensão (Figura 63). A análise da relação entre EI30 e Q30 com o D50 das partículas transportadas em suspensão (Figura 64) demonstrou que, para ambos os casos, existe correlação significativa ($\alpha=0,05$), porém, quanto às partículas grosseiras, esse comportamento não foi observado no trecho de menor uso (Figura 64). Isso ocorreu porque neste trecho o D50 dos materiais superficiais é 0,4mm, ou seja, é o que existe na pista de rolamento disponível para ser arrastado, ou até mesmo colocado em suspensão.

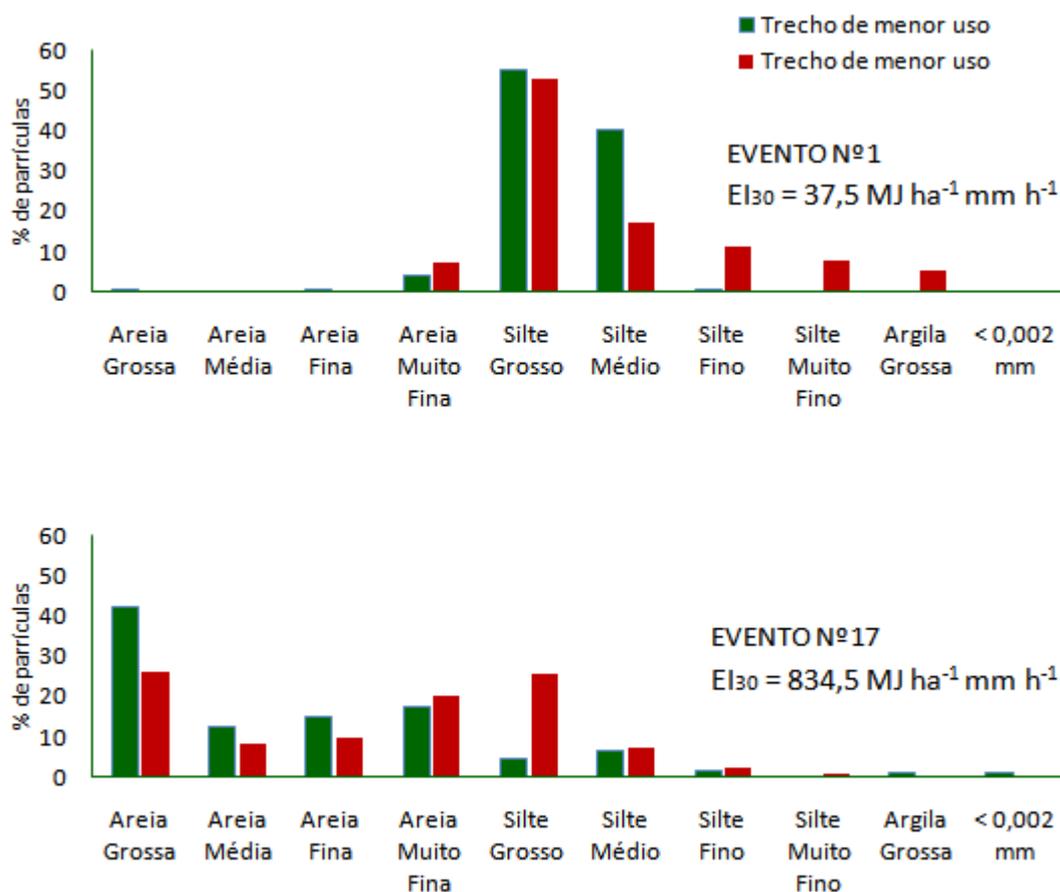


Figura 63 – Modificações na textura das partículas em suspensão com aumento de EI30.

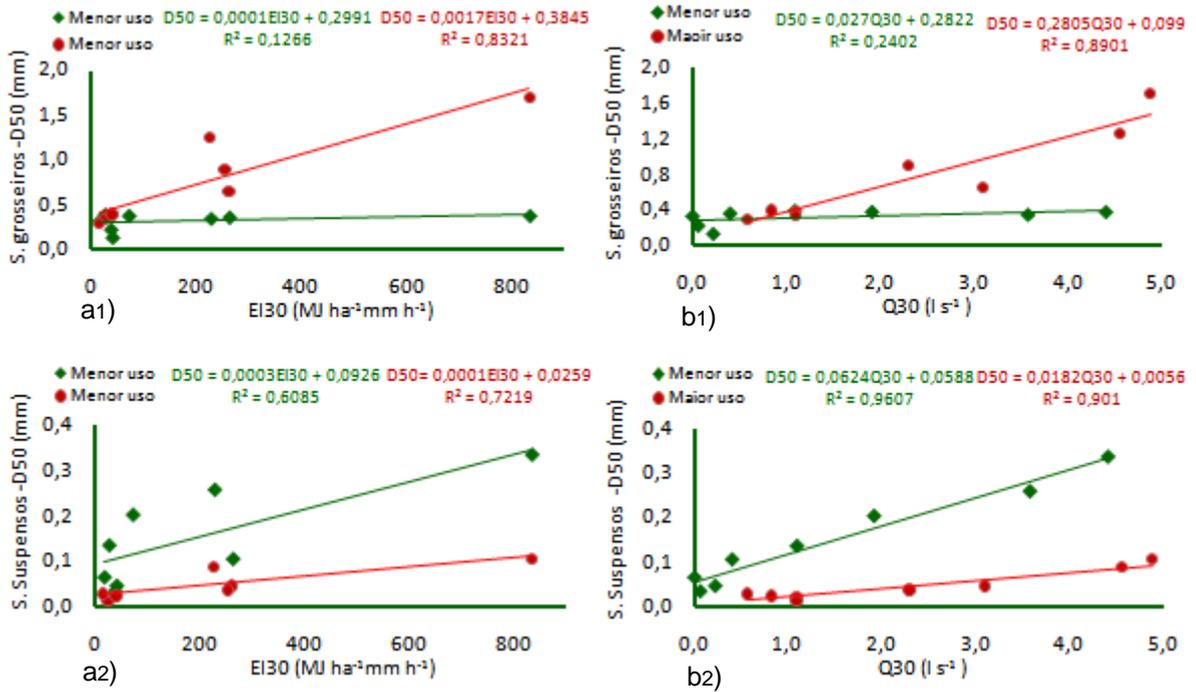


Figura 64 – Relação entre o D50 das partículas transportadas com EI30 (a1 e a2) e Q30 (b1 e b2).

Diferente disso, no trecho de maior uso, o D50 (0,83mm) não pode ser considerado um limite, pois os materiais lançados eram bastante heterogêneos, compreendendo de partículas finas até cascalhos (Figura 65). Assim, a amostra coletada na parte central da estrada forneceu apenas uma informação generalizada sobre a textura; isso explica, por exemplo, o fato de partículas com D50 superior 0,84mm terem sido arrastadas. Ao fim do monitoramento (Figura 66) este trecho apresentava um engrossamento dos materiais superficiais, pois, de acordo com Ramos-Scharrón e Macdonald (2005), as partículas mais finas são transportadas com mais facilidade.



Figura 65 – Materiais lançados sobre o trecho de maior uso na atividade de manutenção.



Figura 66 – Trecho de maior uso no início (a), durante (b) e ao fim (c) do monitoramento.

Por fim, a correlação desenvolvida entre a produção de sedimentos acumulada no período com a respectiva erosividade acumulada foi significativa ($\alpha = 0,01$) para ambos os trechos. Considerando a precipitação média mensal e anual da área de estudo (INCAPER, 2011) e a erosividade da chuva estimada para a região através da Equação 3, proposta por Silva (2001) e apresentada por Pruski (2009b), a produção de sedimentos para os dois trechos monitorados pode ser estimada.

Para isso, as equações 13 e 14, obtidas a partir das curvas de melhor ajuste (Figura 67) foram utilizadas para estimar a produção mensal de sedimentos no trecho de maior uso, enquanto as equações 15 e 16, também obtidas a partir de curvas de melhor ajuste (Figura 68), foram utilizadas para estimar a produção mensal de sedimentos no trecho de menor uso. As equações 14 e 16 foram utilizadas para estimar a produção de sedimentos quando EI30 era menor que $600 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$, pois as Equações 13 e 15 não oferecem boa estimativa quando os valores de EI30 são menores que $100 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$, exibindo inclusive valores negativos.

O índice de erosividade (EI30) anual obtido nesta pesquisa ($6515 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$) está coerente com os valores estimados por Dalla (2011), para a Região SM6 (5670 a $6661 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$), onde se localiza a micro bacia do rio Perdido.

$$P = (0,8704EI30) - 97,637 \quad (13)$$

$$P = (6E-04EI30^2) + (0,3225EI30) - 11,567 \quad (14)$$

$$P = (2E-05EI30^2) + (0,0472EI30) - 9,9663 \quad (15)$$

$$P = (6E-05EI30^2) - (0,0075EI30) + 0,3461 \quad (16)$$

Em que,

P = Produção de sedimentos estimada (g m^{-2}).

EI30 = Índice de erosividade da chuva ($\text{MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$).

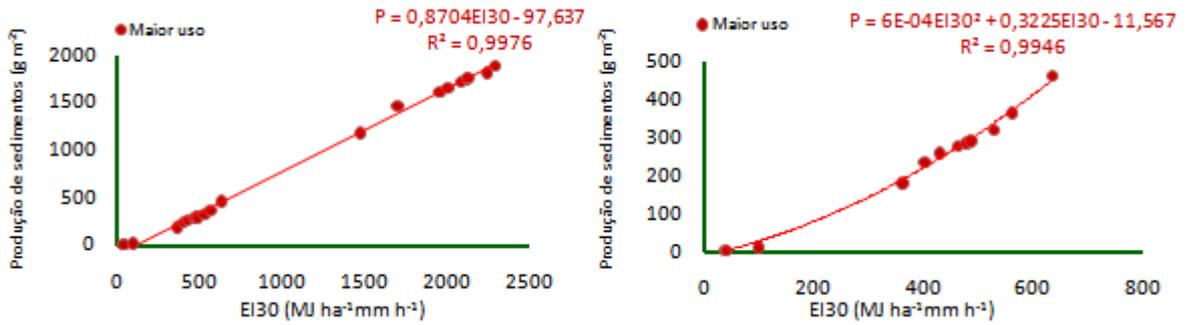


Figura 67 – Relação entre produção de sedimentos e EI30 acumulados – Trecho de maior uso.

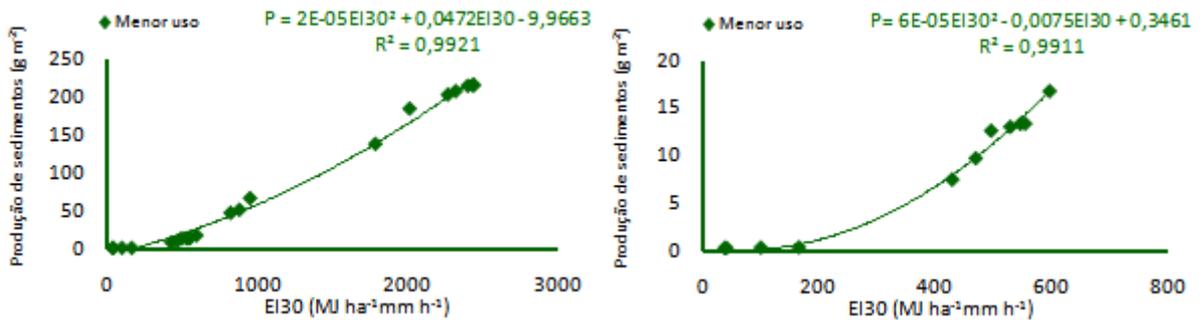


Figura 68 – Relação entre produção de sedimentos e EI30 acumulados – Trecho de menor uso.

Assim, para as condições de monitoramento estabelecidas nesta pesquisa, a produção de sedimentos foi estimada em $4,59 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ($45,9 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) para o trecho de maior uso e $0,36 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ($3,6 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) para o trecho de menor uso, com as maiores perdas mensais ocorrendo nos meses de novembro, dezembro e janeiro (Figura 69). No entanto, os valores previstos para o trecho de maior uso possivelmente encontram-se superestimados, visto que, segundo Ramos-Scharrón e Macdonald (2005) a produção de sedimentos em estradas submetidas à manutenção diminui com o passar dos anos.

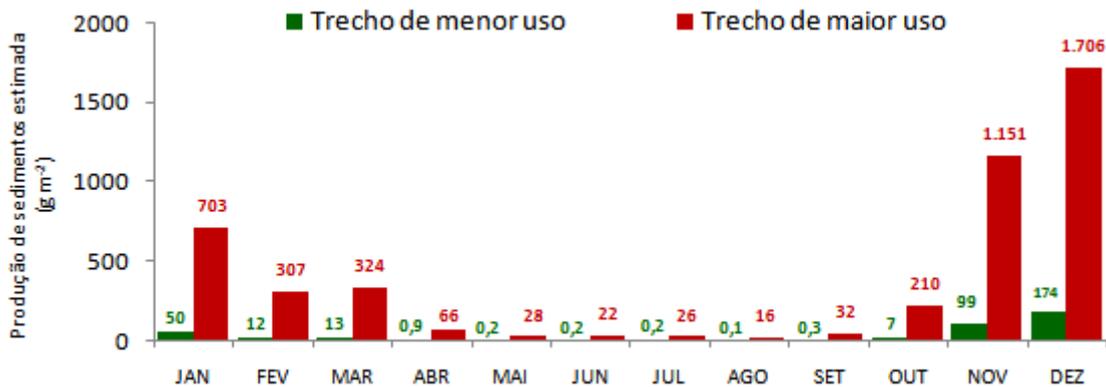


Figura 69 – Estimativa da produção mensal de sedimentos para os trechos monitorados.

5.3 Avaliação da técnica de monitoramento e comparação de resultados

A escolha da técnica de monitoramento esteve apoiada na necessidade de quantificar separadamente a carga de sedimentos grosseiros transportados por arrasto e a carga de sedimentos finos transportados em suspensão, bem como garantir a confiabilidade dos resultados, tendo em vista a quantidade de fatores que poderiam gerar interferências. Caso a massa de partículas em suspensão não tivesse sido quantificada separadamente, os resultados teriam sido subestimados, principalmente no trecho de maior uso. Neste sentido, foi de grande importância quantificar e coletar amostras compostas do escoamento superficial.

O escoamento superficial gerado em um único evento chegou a 16400l e as vazões máximas atingiram $6,3 \text{ l s}^{-1}$. Em laboratório a vazão máxima obtida durante a calibração foi $2,45 \text{ l s}^{-1}$ e, devido ao bom ajuste das curvas de calibração, a determinação das vazões e dos volumes de escoamento foi confiável. As câmaras dos medidores de fluxo apresentaram boa resistência aos impactos e não apresentaram trincas, desconexões etc, no entanto, os componentes eletrônicos utilizados, apresentaram problemas.

Uma das falhas ocorridas foi a queda de tensão da bateria; outra, o não registro dos tombamentos das câmaras pelo data logger. Os motivos das falhas no logger não foram identificados, mas possivelmente estão relacionados à vida útil do instrumento, utilizado em outros monitoramentos. O entupimento do pluviógrafo não era esperado ao início dos trabalhos, o entupimento do tubo coletor no evento 12 foi uma falha pontual, as baterias passaram a ser substituídas com maior frequência. Para todos os casos, foi necessário intensificar a inspeção dos instrumentos.

As valas de proteção construídas acima dos taludes (Figura 70a) garantiram o barramento dos fluxos laterais; o tratamento com lonas plásticas sobre os sedimentos liberados nas escavações foi fundamental para impedir a alteração nos resultados, em especial, no trecho de menor uso. A valeta utilizada para captar o escoamento superficial (Figura 70b), no trecho de maior uso, tornou-se um redutor de velocidade, para motocicletas.

A utilização de calhas com coberturas vazadas – ranhuras ou furos – para substituir as valetas pode constituir uma melhor alternativa para diminuir o risco de acidentes. Nos primeiros eventos de chuva foi verificado que o tubo coletor de amostras compostas do escoamento, por sua forma geométrica, manteve um pequeno volume residual armazenado. Para escoar esse volume residual uma das extremidades do tubo coletor foi modificada (Figura 70c).



Figura 70 – valas de proteção (a), valetas de captação de fluxo (b) e alteração no tubo coletor (c).

Retirar sub-amostras de amostras maiores para envio ao laboratório constituiu a alternativa mais viável para realização do monitoramento, especialmente no que diz respeito à massa de sedimentos grosseiros. No entanto, no que diz respeito à amostra de sedimentos transportados em suspensão, principalmente quando produzidos grandes volumes (Figura 71), a retirada de sub-amostras pode ser mais complicada e promover distorções nos resultados. Assim, uma alternativa seria diminuir o volume coletado em cada tombamento de modo a reduzir o volume final da amostra composta.



Figura 71 – Amostras de escoamento superficial.

Assim, a técnica utilizada permitiu a realização de uma amostragem confiável para monitorar a produção de sedimentos em estradas não pavimentadas, visto que, foi verificada uma boa resposta dos instrumentos e das barreiras instaladas. Nesse sentido, os resultados obtidos expressam de modo confiável a produção de sedimentos para os dois trechos de estradas não pavimentadas, nas condições específicas deste monitoramento.

Como apresentado no capítulo 3, diversas técnicas são utilizadas para quantificar a produção de sedimentos em estradas não pavimentadas e, neste aspecto, as comparações devem ser realizadas com certa cautela. Isso porque, além de não haver consenso quanto às unidades de apresentação dos resultados, estes estão intimamente relacionados aos objetivos de cada monitoramento e expressam a resposta de diferentes tipos de solos, ou materiais superficiais, a diferentes condições climáticas e topográficas.

Repetidas as particularidades de cada monitoramento, os resultados obtidos nesta pesquisa estão coerentes com os obtidos por outros autores. Os coeficientes de escoamento (C) para os dois trechos de estradas ($0,01 \leq C \leq 0,38$ para o trecho de menor uso; $0,01 \leq C \leq 0,45$ para o trecho de maior uso) estiveram próximos daqueles obtidos por Ramos-Scharrón e Macdonald (2007) para 4 trechos de estradas com declividades variando de 9 a 26% ($0,03 \leq C \leq 0,72$). Sheridan e Noske (2007) obtiveram coeficientes entre 0,32 e 0,79, porém estes foram obtidos através dos totais precipitados e escoados durante todo o período de monitoramento.

Os trabalhos de Macdonald, Sampson e Anderson (2001) também identificaram correlação entre o índice de erosividade da chuva (EI30) com a produção de sedimentos para alguns trechos de estradas avaliados ($r=0,29$; $r=0,67$, $r=0,84$ e $r=0,99$), neste sentido, os coeficientes de correlação obtidos para o trecho de menor uso ($r=0,90$) e para o trecho de maior uso ($r=0,98$) estão bem próximos dos melhores resultados alcançados por estes autores. Todavia, encontram-se mais distantes do coeficiente ($r = 0,308$) obtidos por Sugden e Woods (2007).

Os coeficientes de correlação entre produção de sedimentos e o total precipitado por evento de chuva para o trecho de menor uso ($r = 0,46$) e para o trecho de maior uso ($r = 0,63$) também estiveram próximos dos coeficientes obtidos por Macdonald, Sampson e Anderson (2001) nos trechos avaliados por estes autores ($0,62 \leq r \leq 0,83$). Sugden e Woods (2007) obtiveram 0,312; Ramos–Scharrón e Macdonald (2005) obtiveram coeficientes entre 0,083 a 0,995. No entanto, o coeficiente ($r = 0,46$) obtido para o trecho de menor uso não apresentou correlação linear significativa ($\alpha = 0,05$).

Macdonald, Sampson e Anderson (2001) verificaram correlação entre a granulometria das partículas e a erosividade da chuva e obtiveram coeficiente de determinação (r^2) de 0,74. Os resultados desta pesquisa apontaram a existência de correlação entre o D50 das partículas transportadas em suspensão para o trecho de maior uso ($r^2 = 0,72$) e para o trecho de menor uso ($r^2 = 0,60$). Para os sedimentos grosseiros, por razões discutidas anteriormente, esta correlação foi verificada apenas no trecho de maior uso ($r^2 = 0,83$).

A produção de sedimentos em cada trecho apresentou expressiva carga de sedimentos transportada em suspensão correspondendo, em média, a 32% da massa total produzida no trecho de menor uso e 68% do total produzido no trecho de maior uso, alcançando até 82% em um dos eventos, neste trecho de estrada. Sheridan e Noske (2007) monitoraram 10 trechos de estradas e identificaram que a produção de sedimentos era predominantemente composta por partículas transportadas em suspensão (62% a 99%). Grayson *et al.* (1993) verificaram que a massa de partículas transportadas em suspensão correspondeu a 2/3 da massa total.

Ramos-Scharrón e Macdonald (2007) verificaram que as concentrações produzidas por 4 trechos de estradas submetidos a nivelamento da pista durante o período de estudo variaram de 1270 mg l^{-1} a 84400 mg l^{-1} . A concentração média obtida de vinte e sete destas amostras, coletadas após a manutenção das estradas, forneceram uma média de 30000 mg l^{-1} . Em condições de elevado uso e manutenção, Grayson *et al.* (1993) obtiveram concentração média de 23000 mg l^{-1} . Comparando estes resultados, foi verificado que o trecho de maior uso apresentou uma concentração máxima (23685 mg l^{-1}) e média ($6992,7 \text{ mg l}^{-1}$) bem inferior.

A produção de sedimentos obtida no trecho de maior uso, submetido à manutenção, foi estimada em $4,59 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$. Pesquisas realizadas por outros autores, também relacionadas aos efeitos da manutenção em estradas não pavimentadas, alcançaram os seguintes resultados: Fahey e Coker (1989) 1,6 e $11,3 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$; Grayson *et al.* (1993) $5,2 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$; Ramos Scharrón e Macdonald (2005) $11 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$; Sugden Woods (2007) $0,21 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ em 2003 e $0,99 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ em 2004; Ramos-Scharrón e Macdonald (2007) $36 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$.

Guardadas as particularidades e, numa tentativa mais ampla de gerar comparações, foi verificado que, por exemplo, Fahey e Coker (1989) desenvolveram suas pesquisas em terrenos com declividade de 3,5% a 7,5% em solos rasos de origem granítica e em clima temperado úmido. Grayson *et al.* (1993) definiram dois níveis de uso e dois níveis de manutenção em trechos que receberam cascalho sobre a pista de rolamento.

Ramos Scharrón e Macdonald (2005) avaliaram uma estrada nivelada, com 10% de inclinação. Sugden e Woods (2007) realizaram monitoramento de trechos de estradas localizados em áreas em que a maior precipitação anual atingiu 402 mm. Ramos Scharrón e Macdonald (2007) avaliaram 4 trechos que foram nivelados duas vezes durante a experimentação. Assim, de modo geral, a produção de sedimentos do trecho de maior uso foi inferior às produções obtidas em outros trabalhos.

A produção do trecho de menor uso foi $0,36 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, um resultado inferior ao obtido por Sheridan e Noske (2007) para um trecho com pista de silte e argila, 12% de declive, submetida a tráfego de veículos leves ($0,91 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$), e entre os valores encontrados por Ramos-Scharrón e Macdonald (2005) que obtiveram uma produção estimada entre 0,16 e $1,17 \text{ kg m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ para trechos de estradas abandonados com declives entre 2% e 6%, respectivamente. No entanto, a produção de sedimentos no trecho de menor uso está bem próxima daquela obtida por Corrêa e Dedecek (2009) para um trecho de estrada sem tratamento e com 7% de declividade ($0,4 \text{ kg m}^{-2}$) para um período pouco superior a um ano.

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES DE ESTUDOS FUTUROS

A produção de sedimentos no trecho de maior uso foi, em média, quase 10 vezes superior a produção obtida no trecho de menor uso tendo sido produzidos, respectivamente, $93,3 \text{ g m}^{-2}$ e $9,7 \text{ g m}^{-2}$. Vários fatores contribuíram para que o trecho de maior uso apresentasse produção mais elevada, dentre estes, as maiores vazões de escoamento superficial e a manutenção realizada na pista de rolamento que disponibilizou uma grande quantidade de partículas para transporte.

A maior compactação e declividade do trecho de maior uso, associada à forma como este trecho respondeu aos acréscimos na intensidade de precipitação, produziram coeficientes de escoamento mais elevados que aqueles estabelecidos no trecho de menor uso. Assim, foram gerados fluxos superficiais com maiores volumes e vazões, muitas vezes mantidos concentrados sobre a pista de rolamento, intensificando os processos erosivos. Em condições bem diferentes, o trecho de menor uso, menos inclinado e mais permeável, apresentou melhores condições para o crescimento da vegetação e para a infiltração da água no solo, reduzindo o escoamento superficial.

Para os dois trechos de estradas avaliados, as perdas de solo estiveram bem correlacionadas com a erosividade da chuva (EI30), com a vazão máxima média produzida em 30 minutos (Q30) e com o volume de escoamento superficial. A produção de sedimentos não apresentou boa correlação com o total precipitado no trecho de maior uso e nem mesmo apresentou correlação significativa ($\alpha = 0,05$) no trecho de menor uso.

Exceto para os sedimentos grosseiros do trecho de menor uso (ausência de correlação significativa), as análises demonstraram que o D50 das partículas transportadas esteve bem correlacionado com a EI30 e com a Q30, mas as relações com a Q30 apresentaram os melhores coeficientes de determinação. As correlações entre produção de sedimentos e erosividade da chuva acumuladas apresentaram curvas com elevados coeficientes de determinação ($r^2 > 0,99$) e, para as condições deste monitoramento, as equações destas curvas foram considerados modelos adequados para estimar a produção anual de sedimentos em cada trecho.

Quantificar separadamente as partículas transportadas em arrasto e em suspensão permitiu verificar a forma como cada trecho de estrada contribuiu para a produção de sedimentos. No trecho de maior uso, em média, 68% das partículas foram transportadas em suspensão e este valor foi superior a 80% em alguns eventos; no trecho de menor uso esse percentual foi, em média, 32%. Esta estratégia de monitoramento foi muito importante, pois também permitiu verificar o comportamento granulométrico das partículas transportadas em arrasto e em suspensão.

Neste aspecto, a técnica utilizada para quantificar a produção de sedimentos respondeu adequadamente aos objetivos estabelecidos e todas as condições experimentais definidas para o monitoramento puderam ser mantidas. Especificamente, quanto ao tanque de retenção de sedimentos e quanto o medidor de fluxo, estes equipamentos em conjunto forneceram uma excelente alternativa de monitoramento, pois constituíram uma técnica de baixo custo, mediante a importância dos resultados produzidos.

As práticas de manutenção realizadas na bacia do rio Perdido podem ser um indicador dos procedimentos adotados em outras bacias hidrográficas e, nesse sentido, o problema em questão pode ser muito maior que os apontamentos desta pesquisa. Estudos relacionados à produção de sedimentos em estradas não pavimentadas ainda constituem um tema pouco explorado no Brasil e, com isso, abre um leque de possibilidades.

Dentre os principais fatores que afetam a produção de sedimentos em estradas não pavimentadas, o efeito provocado pela manutenção é um tema que precisa ser melhor estudado, visto que, poucas pesquisas trataram diretamente sobre o assunto. Assim, a avaliação dos efeitos da manutenção em trechos com diferentes declives, bem como a comparação da produção de sedimentos em trechos submetidos à manutenção, com e sem o lançamento de materiais sobre a superfície de rolamento, surge como uma oportunidade de melhor compreender o comportamento destes materiais sob a ação das chuvas.

A comparação da produção de sedimentos de estradas não pavimentadas com a produção de outras parcelas de solo, fontes de sedimentos, poderá fornecer importante informação sobre a real contribuição destas estradas em relação à produção total das bacias hidrográficas e em relação às outras fontes de sedimentos monitoradas. A relação entre a erosividade da chuva e a produção de sedimentos tem sido um tema bastante abordado no que se refere às parcelas de solos agrícolas, porém são raros os trabalhos que avaliaram esta relação em estradas não pavimentadas.

Além disso, poucas informações foram produzidas sobre a relação entre a erosividade da chuva e a granulometria das partículas transportadas pelo escoamento superficial. Enfim, face a escassez de trabalhos que avaliaram a produção de sedimentos em estradas não pavimentadas nas condições climáticas brasileiras, estas estradas constituem uma grande fonte de pesquisa, tendo em vista sua importância e seus impactos sobre o meio ambiente.

7. REFERÊNCIAS

- AZEVEDO NETO, J.M. *Manual de hidráulica*. 8 ed. São Paulo: Blucher, 1998. 669p.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*. 6 ed. São Paulo: Ícone, 2008. 355p.
- BERTONI, J.C.; TUCCI, C.M. Precipitação. In: TUCCI, C.M. (Org.). *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2001. cap. 5, p. 177-241.
- BLACK, T.A.; LUCE, C.H. *Measuring water and sediment discharge from a bordered road plot using a settling basin and tipping bucket*. 2007.
- BRAGA, B. *et al.* *O meio aquático*. In: _____ : *Introdução à engenharia ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável*. 2 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. cap. 8, p. 73-124.
- BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). *Glossário de termos técnicos rodoviários*. Rio de Janeiro. 1997. 296p.
- BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). *Manual de conservação rodoviária*. 2. ed. RJ, 2005. 564p.
- BURROUGHS, E.R.; KING, J.G. *Reduction of Soil Erosion on Forest Roads*. USDA – United States Department of Agriculture, 1989.
- CABRAL, J. *et al.* Recursos hídricos subterrâneos. In: PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D. (Org.). *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Porto Alegre: ABRH, 2001. cap. 9, p. 237-277.
- CARVALHO, N.O. *Hidrossedimentologia prática*. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 599p.

CARVALHO, N. O. *et al.* *Guia de Práticas Sedimentométricas*. Brasília: ANEEL, 2000. 154p.

COKER, R.J.; FAHEY, B.D.; PAYNE, J.J. *Fine sediment production from truck traffic, Queen Charlotte Forest, Marlborough Sounds, New Zealand*. *Journal of Hydrology*, v. 31, n. 1, p. 56-64, 1993.

CORRÊA, C.M.C. *Perdas de solo e a qualidade da água procedente de estradas de uso florestal no planalto catarinense*. 2005. 155 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais/Silvicultura) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

CORRÊA, C.M.C.; DEDECEK, R.A. *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, abr./jun. 2009.

CROKE, J. *et al.* *Relative contributions of runoff and sediment from sources within a road prism and implications for total sediment delivery*. *Earth Surface Processes and Landforms*, n. 31, p. 457-468, 2006.

DALLA, L.F.R. *Estimativa da produção de sedimentos nas bacias dos rios Santa Maria do Rio Doce e Santa Joana com utilização da EUPS*. 2011. 94f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

EDWARDS, I.J.; JACKSON W.D.; FLEMING, P.M. *Tipping bucket gauges for measuring run-off from experimental plots*. *Agricultural Meteorology*, n. 13, p. 189-201, abr. 1974.

FAHEY, B.D.; COKER, R.J. *Forest road erosion in the granite terrain of Southwest Nelson, New Zealand*. *Journal of Hydrology (NZ)*, v. 28, n. 2, p. 123-141, 1989.

FONTANA, C.R.; LIMA, W.P.; FERRAZ, S.F.B. *Avaliação da remoção de sedimentos pela operação de nivelamento de estradas florestais*. *Scientia Florestalis*, n.76, p. 103-109, dez.2007.

GARCIA, A.R. *et al.* *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.

GOMI, T.; MOORE, R.D.; HASSAN, M.A. *Suspended sediment dynamics in small forest streams of the pacific northwest.* Journal of the American Water Resources Association, p. 877-898, ago.2005.

GRAYSON, R.B. *et al.* *Water quality in mountain ahs forests – separating the impacts of roads from those of logging operations.* Journal of Hydrology, 150, p. 459-480, 1993.

GRIEBELER, N.P.; PRUSKI, F.F.; SILVA, J.M.A. Controle da erosão em estradas não pavimentadas. In: PRUSKI, F.F. (Editor), *Conservação de Solo e água: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica.* Viçosa: UFV, 2009. cap. 7, p. 166-215.

INCAPER. INSTITUTO CAPIXADA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL. *Programa de assistência técnica e extensão rural PROATER 2011-2013: Santa Teresa.* 2011.

JONES, J.A. *et al.* *Effects of rods on hidrology, geomorphology, an disturbance patches in stream networks.* Conservation Biology, v. 14, n. 8, p. 76-85, 2000.

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

LARSON, R.; FARBER, B. Correlação e regressão. In:_____. Estatística Aplicada. 2 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007. Cap. 9, p. 333-369.

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

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. 26, p. 251-272, 2001.

MARCELINO, F.A. *Avaliação dos sistemas de redes viárias florestais em função dos custos e do risco de erosão*. 2007. 129f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

MOLL, J; COPSTEAD, R; JOHANSEN, D.K. *Traveled Way Surface Shape*. United States Department of Agriculture, 1997.

OLIVEIRA, G.C. *et al. Rotina computacional para a determinação da velocidade de sedimentação das partículas do solo em suspensão no escoamento superficial*. Engenharia Agrícola, v. 25, p. 126-136, 2005.

OLIVEIRA, J.F. *et al. Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento em solos de estradas não pavimentadas*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, p. 955-960, 2009.

PRUSKI, F.F. Processo físico de ocorrência da erosão hídrica. In:_____. *Conservação de solo e água: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica*. Viçosa: UFV, 2009a. cap. 2, p. 24-39.

_____. Fatores que interferem na erosão hídrica do solo. In:_____. *Conservação de solo e água: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica*. 2009. Viçosa: UFV, 2009b. cap. 3, p. 40-73.

_____. Escoamento superficial. In:_____. *Conservação de solo e água: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica*. 2009c. Viçosa: UFV, 2009c. cap. 5, p. 108-131.

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

RAMOS-SCHARRÓN, C.E.; MACDONALD, L.H. *Measurement and prediction of sediment production from unpaved roads, St John, US Virgin Islands*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, p. 1283-1304, 2005.

RAMOS-SCHARRÓN, C.E.; MACDONALD, L.H. *Runoff and suspended sediment yields from an unpaved road segment, St John, US Virgin Islands*. *Hydrological Processes*, 21, p. 35-50, 2007.

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

REZENDE, M. *et al.* Propriedades do solo e interpretação. In:_____. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. Lavras:UFLA, 2007. cap. 2, p.33-89.

SANTOS, I. *et al.* Medições de variáveis hidrológicas. In:_____. *Hidrometria aplicada*. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001. cap. 2, p. 37-97.

SHERIDAN, D.J. *et al.* *The effect of truck traffic and road water content on sediment delivery from unpaved forest roads*. *Hydrological Processes*, 20, p. 168-1699, 2006.

SHERIDAN, G.J.; NOSKE, P.J. *A quantitative study of sediment delivery and stream pollution from different forest road types*. *Hydrological Processes*, v 21, p. 387-398, 2007.

SILVA; M. *et al.* *Avaliação e espacialização da erosividade da chuva no vale do rio Doce, região centro-leste do estado de Minas Gerais*. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 34, p. 1029-1039, 2010.

SIMÕES, S.J.C.; COIADO, E.M. Processos erosivos. In: PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D. (Org.). *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Porto Alegre: ABRH, 2001. cap. 10. p. 283-293.

SUGDEN, B.B.; WOODS, S.W. *Sediment production from forest roads in western Montana*. Journal of the American Water Resources Association, v. 43, n.1, p. 193-205, fev. 2007.

TOLEDO, M.C.M.; OLIVEIRA, S.M.B; MELFI, A.J. Intemperismo e formação do solo. In: TEIXEIRA, W. *et al.* (Org.). *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. cap.8, p. 139-166.

TURTON, D.J.; SMOLEN, M.D.; STEBLER, E. *Effectiveness of BMP in reducing sediment from unpaved roads in the stillwater creek, Oklahoma Watershed*. Journal of the American Water Resources Association, v. 45, n.6, p. 1343-1351, dez. 2009.

VALVERDE, A.E.L. *et al.* *Análise regional de chuvas intensas para a bacia do rio Doce*. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v 8, n. 4, out/dez, p. 157-168, 2003.

VEIGA, L.A.K.; ZANETTI, M.A.Z.; FAGGION. P.L. Nivelamento. In: _____. *Fundamentos de Topografia*. UFPR, 2012. cap. 12, p.187-234.

VENZELA, L.S.; HERNANDEZ, F.B.T.; FRANCO, R.A.M. *Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Córrego Três Barras, Marinópolis*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, n. 1, p. 55-64, 2010.

WEMPLE, B.C.; JONES, J.A. *Runoff production on forest roads in a steep, mountain catchment*. Water Resources Research, v. 39, n. 8, p. 8-1 – 8-17, 2003.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D. *Predicting rainfall erosion losses – A guide to conservation planning*. United States Department of Agriculture, 1978.

WOOD, P.J.; ARMITAGE, P.D. *Biological effects of fine sediment in the lotic Environment*. Environmental Management, v. 21, n. 2. p. 203-217.

ZIEGLER, A. D.; *et al.* *Horton overland flow contribution to runoff on unpaved mountain roads: A case study in northern Thailand.* *Hydrological Processes*, 20, p. 3203-3208, 2001.