

ALESSANDRA REIS GARCIA

**USO DO MODELO WEPP (WATER EROSION PREDICTION PROJECT)  
MODIFICADO PARA ESTIMAR TAXAS DE EROSÃO EM ESTRADAS  
FLORESTAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2001

ALESSANDRA REIS GARCIA

**USO DO MODELO WEPP (WATER EROSION PREDICTION PROJECT)  
MODIFICADO PARA ESTIMAR TAXAS DE EROSÃO EM ESTRADAS  
FLORESTAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 21 de novembro de 2001.

---

Prof. Elias Silva  
(Conselheiro)

---

Prof. Amaury Paulo de Souza  
(Conselheiro)

---

Prof. Neylor Alves Calasans Rego

---

Pesq. Luciano José Minette

---

Prof. Carlos Cardoso Machado  
(Orientador)

## DEDICO

Ao meu esposo,

José Américo Soares Garcia, por trilhar comigo este difícil caminho, e pelo nosso filho Marcos, que foi o que melhor nos aconteceu.

Ao meu querido pai, Antônio Carlos, que iluminou minha vida, incentivando e mostrando sempre o melhor caminho a seguir.

Saudades eternas...

À minha mãe, Maria Angélica, pelo estímulo e exemplo de vida.

## **AGRADECIMENTO**

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Engenharia Florestal, pela oportunidade de realização do curso de Doutorado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de estudo e pelo apoio dado à pesquisa nacional.

À Empresa Duratex S.A., pelo fornecimento dos materiais necessários para a realização deste trabalho.

Ao professor Carlos Cardoso Machado, pela orientação dedicada, amizade, paciência e compreensão nos momentos difíceis.

Aos conselheiros Elias Silva e Amaury Paulo de Souza, pelas críticas e sugestões.

Ao pesquisador Luciano José Minetti e ao professor Neylor Alves Calasans Rego, pela amizade e colaboração.

Aos professores Francisco Lombardi Neto, Isabella Clerici De Maria, Rubens Angulo Filho e Henrique Marinho Leite Chaves, pelas importantes considerações.

À Dalila Campos de Medeiros Fernandes, pela amizade, atenção e dedicação incondicional.

À Silvana Lages Ribeiro Garcia, pela amizade, pelo desprendimento e auxílio na análise estatística dos dados.

Ao Alessandro Machado Fontes e Osmar Silva, pelo auxílio nos trabalhos de coleta de dados.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

## **BIOGRAFIA**

ALESSANDRA REIS GARCIA, filha de Antônio Carlos Reis e Maria Angélica Ferreira Reis, nasceu em 8 de novembro de 1968, em Viçosa, Estado de Minas Gerais.

Em janeiro de 1993, diplomou-se em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – Minas Gerais.

Em agosto de 1993, ingressou no curso de Mestrado em Ciência Florestal, na Universidade Federal de Viçosa, concentrando seus estudos na área de Colheita Florestal. Em 28 de fevereiro de 1996, submeteu-se aos exames finais de defesa de tese.

Em novembro de 1996, ingressou no curso de Doutorado em Ciência Florestal, na Universidade Federal de Viçosa, concentrando seus estudos na área de Estradas Florestais. Em 21 de novembro de 2001, submeteu-se aos exames finais de defesa de tese.

## CONTEÚDO

	Página
RESUMO .....	viii
ABSTRACT .....	x
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	3
2.1. Estradas florestais .....	3
2.2. Impactos ambientais das estradas florestais .....	4
2.2.1. Ar .....	5
2.2.2. Recurso hídrico (turbidez e assoreamento) .....	5
2.2.3. Recurso hídrico (interrupção do fluxo d'água) .....	6
2.2.4. Recurso hídrico (vazão) .....	6
2.2.5. Recurso edáfico (compactação e erosão) .....	7
2.2.6. Flora terrestre .....	7
2.2.7. Fauna terrestre (vertebrados e insetos) .....	8
2.2.8. Flora e fauna aquáticas .....	8
2.2.9. Desenvolvimento regional .....	9
2.2.10. Paisagismo .....	10
2.3. Erosão .....	10
2.3.1. Erosão hídrica .....	11
2.3.1.1. Erosão laminar .....	12
2.3.1.2. Erosão em sulcos .....	12
2.3.1.3. Erosão em voçorocas .....	13
2.3.2. Erosão nas estradas florestais .....	16
2.3.2.1. Componentes da estrada .....	21
2.3.2.2. Taxas de erosão das estradas .....	22
2.3.2.3. Técnicas para mitigação da erosão .....	26
2.4. Modelo WEPP ("Water Erosion Prediction Project") .....	28
2.4.1. Componentes do modelo WEPP .....	30

	Página
2.4.1.1. Geração de clima .....	30
2.4.1.2. Hidrologia .....	30
2.4.1.3. Crescimento de plantas.....	30
2.4.1.4. Solos .....	31
2.4.1.5. Erosão.....	31
2.4.2. Equação de erosão utilizada pelo modelo WEPP .....	31
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	34
3.1. Localização .....	34
3.2. Componentes .....	34
3.3. Dimensionamento do sistema coletor .....	39
3.4. Coleta dos dados .....	41
3.5. Interpretação dos resultados.....	43
3.6. Validação do modelo WEPP .....	44
3.7. Delineamento estatístico.....	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4.1. Análise de variância .....	46
4.2. Médias do volume de enxurrada e peso do solo .....	47
4.3. Estimativas do volume de enxurrada e peso do solo em função da precipitação.....	75
4.4. Estimativas do peso do solo em função do volume de enxurrada.....	80
4.5. Comparação entre valores observados e valores preditos pelo WEPP.....	83
5. CONCLUSÕES .....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
APÊNDICE.....	94

## RESUMO

GARCIA, Alessandra Reis, D.S., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2001. **Uso do modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) modificado para estimar taxas de erosão em estradas florestais.** Orientador: Carlos Cardoso Machado. Conselheiros: Amaury Paulo de Souza e Elias Silva.

Este trabalho teve como objetivo geral determinar o volume total de água escoada e a produção de sedimentos provenientes de segmentos de estradas florestais submetidas às condições de chuva natural e, com esses resultados, validar o modelo WEPP por meio de comparações entre dados observados e dados preditos pelo modelo. A pesquisa foi realizada no projeto de reflorestamento, povoamento de *Pinus caribaea* Morelet e *Pinus oocarpa* Schiede, pertencente à Fazenda Monte Alegre, em Agudos – São Paulo. O universo abrangido pela pesquisa foi constituído de 16 segmentos de estrada. Foram estudadas duas declividades (1 e 7%) e dois comprimentos (20 e 40 m), caracterizando quatro tratamentos: comprimento do segmento de 20 m e 1% de declividade, comprimento de 40 m e 1% de declividade, comprimento de 20 m e 7% de declividade e comprimento de 40 m e 7% de declividade. De cada tratamento foram feitas quatro repetições. Para determinação da quantidade de material erodido foram instalados tambores coletores, localizados na parte inferior das estradas. Posteriormente, os arquivos de clima, precipitação,

solo, inclinação e comprimento do segmento foram introduzidos e adaptados ao modelo de predição de erosão WEPP com o propósito de dar validação a este, visando a confecção de um modelo apropriado às condições florestais brasileiras. Os resultados das análises permitiram concluir o seguinte: a) nos valores observados de volume de enxurrada, o efeito de comprimento do segmento de estrada foi significativo, ao passo que o efeito de declividade não apresentou diferença significativa; b) nos valores observados de peso do solo, o efeito de declividade do segmento foi mais significativo que o efeito de comprimento; c) nos valores de volume de enxurrada e peso do solo preditos pelo modelo WEPP, o efeito de declividade do segmento foi mais significativo que o efeito de comprimento; d) à medida que se aumentou a precipitação, ocorreu aumento quadrático do volume de enxurrada observado em todos os tratamentos; e) à medida que a precipitação aumentou, ocorreu aumento linear do peso do solo observado no comprimento do segmento de 20 m e 1% de declividade; entretanto, nos outros tratamentos, o aumento no peso do solo observado foi quadrático; f) em todos os tratamentos, o peso do solo observado cresceu exponencialmente em função do incremento no volume de enxurrada; g) na validação do modelo WEPP, os valores preditos de volume de enxurrada foram em média 166,58% superiores aos dados observados; h) os valores observados de peso do solo na declividade de 1% apresentaram variação superior de 1125,09% no segmento de estrada com 20 m de comprimento e de 724,41% no segmento com 40 m de comprimento, em relação aos valores preditos pelo modelo WEPP, indicando que, nas menores declividades, o modelo se comportou de forma não-satisfatória, subestimando as perdas; i) os valores de peso do solo preditos pelo modelo WEPP na declividade de 7% apresentaram variação superior de 6,73% no segmento de estrada com 20 m de comprimento e de 120,25% no segmento com 40 m de comprimento, em relação aos valores observados; e j) o modelo brasileiro de predição de erosão pela água (WEPP – Brasil) não se encontra totalmente calibrado para nossas condições.

## ABSTRACT

GARCIA, Alessandra Reis, D.S., Universidade Federal de Viçosa, November 2001. **Use of the model WEPP (Water Erosion Prediction Project) modified to estimate erosion rates in forest roads.** Adviser: Carlos Cardoso Machado. Committee Members: Amaury Paulo de Souza and Elias Silva.

The general objective of this work was to determine the total volume of the water runoff and the production of sediments from segments of forest roads under normal rainfall conditions, and, with the results, to test the WEPP model through comparisons between data observed and data predicted by the model. The research was carried out in a reforestation project with *Pinus caribaea* Morelet and *Pinus oocarpa* Schiede plantations, of the Fazenda Monte Alegre, in Agudos – São Paulo State, Brazil. The area covered by the research was of 16 road segments. Two slopes (1 and 7%) and two lengths (20 and 40 m) were studied, totalling four treatments: length of the segment of 20 m and slope of 1%; length of 40 m and slope of 1%; length of 20 m and slope of 7%; and length of 40 m and slope of 7%. Of each treatment, four repetitions were made. For the determination of amount of eroded matter, collector drums were placed in the lowest part of the roads. Later, files of climate, precipitation, soil, slope and segment length were included and adapted to the erosion prediction WEPP model, with the purpose of validating the model, viewing the elaboration of a

model suited to the Brazilian forest conditions. The analyses results allowed the following conclusions: a) in the observed volumes of runoff, the effect of road segment length was significant, while the slope effect did not present a significant difference; b) in the observed values of soil weights, the slope effect of the segment was more significant than the length effect; c) in the values of runoff volume and soil weight predicted by the WEPP model, the slope effect of the segment was more significant than the length effect; d) as the precipitation increased, the runoff volume increased in a quadratic way, which was observed in all the treatments; e) as the precipitation increased, a linear increase of soil weight occurred in the segment length of 20 m and slope of 1%. However, in the other treatments, the increase observed in soil weight was quadratic; f) in all the treatments, the observed soil weight increased exponentially in function of the increase in the runoff volume; g) in the validation of the WEPP model, the runoff volumes predicted were, in average, 166.58% greater than the observed data; h) the observed soil weight values in the 1% slope presented a higher variation of 1125.09% in the road segment with length of 20 m, and 724.41% in the segment with 40 m in relation to the values predicted by the WEPP model. This indicates that, in lower slope values, the behaviour of the model was not satisfactory, subestimating losses; i) the soil weight values predicted by the WEPP model in the 7% of slope presented a higher variation of 6.73% in the road segment of 20 m, and 120.25% in the segment of 40m, in relation to the observed values; and j) the Brazilian model for prediction of erosion by water (WEPP-Brasil), is not totally adjusted to these conditions.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos países mais desenvolvidos, o combate à degradação do meio ambiente já se tornou realidade há algum tempo e, felizmente, esse espírito conservacionista chegou ao Brasil, posto que, nos últimos anos, tem aumentado a preocupação em disciplinar o uso dos recursos naturais, visando assegurar a conservação da qualidade do meio ambiente.

Assim, é imprescindível que sejam realizados estudos relacionados aos aspectos ambientais, econômicos e técnicos, para que as soluções e alternativas adotadas efetivamente tenham em si incorporadas medidas de redução de impactos negativos sobre o meio ambiente.

Nesse sentido, apesar dos esforços da pesquisa e da extensão, a conservação do solo é ainda um grande problema no Brasil, principalmente no que diz respeito à erosão causada pela água.

Para enfrentar a realidade nacional, em se tratando de proteção e controle dos danos ao meio ambiente oriundos da implantação das estradas florestais, é necessário o desenvolvimento de uma tecnologia adequada, mediante o estabelecimento de normas capazes de propiciar elementos técnico-científicos a projetos de prevenção de erosão nas áreas de domínio estradal.

Com base no exposto, o objetivo geral deste trabalho foi determinar o volume total de enxurrada e a produção de sedimentos provenientes dos segmentos de estradas florestais submetidas à chuva natural, situados em Latossolo Vermelho-Escuro, com greides de 1 e 7% e comprimentos de rampa

de 20 e 40 m, proporcionando a partir desses levantamentos o desenvolvimento de um modelo brasileiro de predição de erosão em estradas florestais, modificando-se o aplicativo WEPP (“Water Erosion Prediction Project”).

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Estradas florestais**

As estradas são obras públicas de vital importância para o desenvolvimento, uma vez que se trata do principal meio de escoamento da produção agroindustrial e permitem o intercâmbio entre as comunidades rurais e/ou urbanas (DADALTO et al., 1990).

As estradas rurais são vias de acesso essenciais das comunidades, pois através delas é que se dá o escoamento da produção agrícola, o transporte das matérias-primas, em suma, o carreamento das riquezas nacionais. Essas razões mostram a importância dos trabalhos de conservação das estradas (BERTOLINI et al., 1993).

As estradas não-pavimentadas, principalmente na região de relevo acidentado, têm dificultado o escoamento normal da produção, em face de suas condições precárias no período de chuvas mais frequentes. Esse fato tem causado prejuízos tanto para o setor privado como para o setor público, o qual está sempre envolvido com a recuperação dessas vias. O estado precário das estradas, no período chuvoso, deve-se, basicamente, à carência de obras complementares que tenham por finalidade minimizar a velocidade das enxurradas (DADALTO et al., 1990).

Considerando o alto custo da técnica de pavimentação, torna-se premente a adoção de tecnologias alternativas, que possibilitem a manutenção

das estradas de terra em níveis aceitáveis de custo e que proporcionem boas condições de tráfego durante o ano todo (BERTOLINI et al., 1993).

Como as águas pluviais constituem a principal causa de erosão nas estradas, revestem-se de grande importância a captação e o disciplinamento dessas águas, de forma a mitigar seu efeito destruidor, acumulando-as em locais determinados, forçando sua penetração na terra, favorecendo o abastecimento do lençol freático e, conseqüentemente, alimentando fontes e nascentes naturais. Tem-se a considerar que os problemas inerentes ao manejo inadequado das águas pluviais oriundas das estradas causam danos consideráveis a estas e às áreas adjacentes, uma vez que estas recebem o deflúvio superficial das estradas (BERTOLINI et al., 1993).

## **2.2. Impactos ambientais das estradas florestais**

Impacto ambiental é definido como qualquer alteração das propriedades químicas, físicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas, que, direta ou indiretamente, afetam: a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; e a qualidade dos recursos ambientais (CONAMA, 1986).

A rigor, têm-se impactos positivos associados a um planejamento adequado, isto é, com base sólida de princípios de desenvolvimento sustentável, e, portanto, a um planejamento integrado ao uso racional do solo e dos recursos naturais, assim como, por outro lado, têm-se impactos negativos associados à falta de planejamento ou a um processo de planejamento definido por critérios econômicos e técnicos, independentemente de restrições ambientais (TEIXEIRA, 1995).

Em se tratando de estradas, podem-se associar impactos ambientais em função da infra-estrutura, do tráfego ou do fator de acessibilidade e considerando-se os aspectos de políticas públicas, planejamento, projeto, construção, operação, manutenção e conservação. Os impactos, por sua vez, são observados nos meios físico, biótico e socioeconômico (TEIXEIRA, 1995).

Há muito tempo as estradas têm sido agentes impactantes ao meio ambiente, principalmente no Brasil, em que a construção destas geralmente

não tem sido planejada de forma compatível com o local nem seguido os padrões necessários de segurança (MOTTA, 1993).

SILVA (1994) identificou os seguintes impactos ambientais advindos da construção das estradas florestais:

### **2.2.1. Ar**

A qualidade do ar é afetada pela construção das estradas florestais, pois há o emprego de maquinarias diversas que atuam na emissão, para a atmosfera, de gases resultantes de combustão. Da mesma forma, há o comprometimento da qualidade do ar, em virtude da emissão de partículas sólidas (poeira) para a atmosfera, resultante do manuseio de terra e do tráfego de veículos diversos (SILVA, 1994).

### **2.2.2. Recurso hídrico (turbidez e assoreamento)**

A abertura das estradas promove o aumento da turbidez e o consequente assoreamento dos canais de drenagem, em virtude da erosão do solo da faixa terraplenada (Megahan, 1977; Machado e Souza, 1990, citados por SILVA, 1994), notadamente em locais mais suscetíveis aos fenômenos erosivos, pelo tipo de solo ou relevo, e em situações de maior densidade de estradas (SILVA, 1994).

O assoreamento consiste no aporte de material mineral (areia, silte, argila) a um corpo d'água, diminuindo a sua profundidade e o seu volume útil e prejudicando diversos usos da água. A principal origem do assoreamento está relacionada a movimentos de terra (construção de estradas) na bacia de drenagem do rio ou do lago. Por ação das chuvas, esse material é então carregado até o corpo d'água. Em relação a esse aspecto, deve ser lembrado que as precipitações pluviométricas em regiões tropicais são bastante intensas (intensidade = quantidade de chuva por unidade de tempo), o que evidentemente reforça a preocupação com a poluição devida ao assoreamento. Além disso, a par do fato de nossos solos serem via de regra facilmente erodíveis, ocorre com frequência a remoção da cobertura vegetal nas atividades antrópicas. Além da redução no volume do corpo d'água, o fenômeno de assoreamento

também afeta o componente estético, provocando a formação gradual e muitas vezes acelerada de extensas “línguas” de terra, que vão ocupando e destruindo o espelho d’água. Um outro aspecto negativo refere-se à eliminação parcial da comunidade bentônica, ou seja, daquela que habita o fundo dos rios e lagos e que exerce importante papel na cadeia alimentar e na regulação ecológica do corpo d’água (Von SPERLING, 1997).

Os sedimentos em suspensão aumentam o custo de tratamento da água para abastecimento da população, além de causarem danos a equipamentos como turbinas, bombas e materiais de irrigação. A deposição de sedimentos em rios e estuários aumenta a necessidade de dragagens, a fim de evitar problemas para sistemas de transporte hidroviário e para as usinas hidrelétricas (SOUZA et al., 1991).

### **2.2.3. Recurso hídrico (interrupção do fluxo d’água)**

Segundo SILVA (1994), uma outra forma de impacto da construção de estradas florestais ocorre quando há interrupções do fluxo d’água, pela negligência ou pelo inadequado planejamento da sua locação em pontos de cruzamento com pequenos canais de drenagem. Nessa situação, ocorre o represamento das águas, com uma série de conseqüências sobre a vida aquática, uma vez que o ambiente outrora lótico passa a lêntico, ocasionando acentuadas modificações na qualidade do recurso hídrico.

### **2.2.4. Recurso hídrico (vazão)**

A construção da rede viária florestal implica a compactação do solo da faixa terraplenada e, conseqüentemente, o favorecimento de processos de escoamento superficial e subsuperficial, em detrimento dos fenômenos de infiltração e percolação da água no perfil do terreno. Dessa forma, essa atividade contribui para a desregularização da vazão dos mananciais hídricos, ou seja, para a maior amplitude entre as vazões mínimas e máximas registradas nos cursos d’água da região (SILVA, 1994).

### **2.2.5. Recurso edáfico (compactação e erosão)**

A exposição e a compactação do solo promovidas pela construção da rede viária estão associadas à ocorrência de fenômenos erosivos. Os focos erosivos são a principal fonte produtora de material mineral que pode provocar o assoreamento dos corpos d'água. Muito embora exista uma erosão de origem natural, sabe-se que a maior parte dos processos erosivos é derivada de interferência humana, notadamente para a abertura de loteamentos e construção de estradas. Nessas situações ocorre a remoção da cobertura vegetal existente e a compactação da faixa terraplenada, diminuindo a capacidade do solo de infiltração de água e retenção de partículas (SILVA, 1994).

A construção de estradas exige o tráfego de veículos pesados, fazendo com que haja compactação do solo na área a ser construída e nas adjacências. Ocorrem, também, problemas de mesma natureza com as áreas de empréstimo necessárias às obras de construção. A camada superficial do solo que compõe a estrada sofre um processo de impermeabilização, fazendo com que o escoamento da água de chuva se processe com mais energia cinética, causando lavagem dos solos adjacentes às estradas, diminuindo assim a qualidade do "site" local (MOTTA, 1993).

Os efeitos mais imediatos da erosão e sedimentação oriundos das estradas florestais são alteração na produtividade da floresta, deterioração da qualidade da água, perda dos valores estéticos e paisagísticos do panorama florestal e aumento dos serviços de manutenção da rede rodoviária florestal (MACHADO e MALINOVSKI, 1986).

### **2.2.6. Flora terrestre**

Conforme SILVA (1994), a construção da rede viária florestal implica a erradicação da vegetação original existente ao longo do seu leito, bem como no decapeamento do solo superficial, o qual abriga a maior parte do banco de propágulos vegetais, como sementes, rizomas, bulbos e estolões, ocasionando a redução espacial e a fragmentação da vegetação, com o conseqüente estreitamento da sua base genética, comprometendo a biodiversidade.

### **2.2.7. Fauna terrestre (vertebrados e insetos)**

A erradicação da cobertura vegetal ao longo da rede viária afeta a fauna terrestre, à medida que representa uma redução espacial do habitat silvestre. Soma-se a isso o fato de que a utilização de diferentes maquinarias e a presença do homem nos trabalhos de implantação das estradas afugentam a fauna terrestre, principalmente de mamíferos (SILVA, 1994).

### **2.2.8. Flora e fauna aquáticas**

Ao propiciar a ocorrência de fenômenos erosivos, com o consequente aumento da turbidez e progressivo assoreamento dos cursos d'água, a atividade de implantação da rede viária florestal causa impactos na comunidade aquática. O efeito mais perceptível refere-se ao processo de eutrofização do recurso hídrico (Esteves e Barbosa, 1986; Tundisi, 1986, citados por SILVA, 1994) e à elevação exagerada do nível de turbidez. Esta última dificulta a penetração de luz, comprometendo o processo fotossintético e, portanto, a produtividade global do ecossistema aquático. Com isso, são afetados todos os organismos aquáticos, em razão da interdependência entre ambos, como é o caso dos peixes que se alimentam de plâncton (SILVA, 1994).

As principais consequências da má qualidade da água são a redução no tamanho da população e na saúde dos peixes, principalmente em rios e córregos de baixo volume de água (JOHNSTON, 1976).

A eutrofização, por sua vez, é o fenômeno que transforma um corpo d'água em um ambiente bastante fertilizado, o que implica um crescimento excessivo de plantas aquáticas. Devido à presença de nutrientes em excesso, os organismos vegetais encontram condições favoráveis ao seu crescimento, o qual pode atingir proporções intensas, caracterizando-se assim o estabelecimento da eutrofização. Em alguns casos, a disponibilidade de nutrientes é tão grande que os organismos vegetais chegam a cobrir completamente o espelho d'água de lagos e represas. São nesses ambientes que a eutrofização ocorre com maior intensidade, principalmente em razão do elevado período de residência da água, o qual proporciona tempo suficiente para o crescimento das plantas aquáticas, notadamente algas e macrófitas (plantas aquáticas

superiores). Em rios a eutrofização é menos freqüente devido ao fluxo normal da água (baixos tempos de residência da água), que cria condições desfavoráveis ao crescimento de plantas aquáticas. O crescimento exagerado da vegetação aquática faz com que, após sua morte, sejam demandadas grandes quantidades de oxigênio para sua decomposição. É exatamente este o problema principal da eutrofização, ou seja, uma influência negativa no balanço de oxigênio como conseqüência da decomposição da vegetação aquática que cresceu exageradamente devido à presença de nutrientes em excesso. Além de prejuízos ao balanço de oxigênio, a eutrofização causa uma série de inconvenientes, como geração de maus odores, distúrbios com mosquitos e insetos, cujas larvas encontram condições favoráveis de desenvolvimento nas folhas das plantas aquáticas, mortandade de peixes, solubilização de compostos diversos na região do fundo do corpo d'água (em decorrência da anaerobiose), prejuízos à navegação e recreação, etc. Particularmente graves são os problemas causados pelas algas em águas de abastecimento. Muitas das algas que se desenvolvem em lagos e represas eutrofizados são tóxicas tanto ao homem quanto aos animais, além de conferirem à água sabor e odor repugnantes. Essas algas interferem ainda negativamente nas diversas etapas do tratamento de água, seja prejudicando a floculação (pela modificação do pH), a decantação (pela excreção de compostos oleosos, que dificultam sua sedimentação) e a filtração (entupimento de filtros), seja aderindo a paredes do reservatório ou incrustando-se em redes de distribuição (Von SPERLING, 1997).

### **2.2.9. Desenvolvimento regional**

Segundo SILVA (1994), a implantação da rede viária florestal contribui para o desenvolvimento regional, já que ela é utilizada, de certa forma, por toda a comunidade da região. Desse modo, dinamiza-se a capacidade de escoamento da produção da região, bem como a possibilidade de deslocamento de um ponto a outro, com reflexos benéficos sobre o desenvolvimento regional.

### **2.2.10. Paisagismo**

A implantação das estradas florestais causa impactos visuais (Machado, 1992, citado por SILVA, 1994), notadamente em pessoas com acurado rigor na qualidade estética da paisagem. Isso se deve ao fato de que as estradas e os acessos representam uma artificialização da paisagem, haja vista o seu cunho antrópico, comprometida ainda mais quando surgem focos de erosão no seu leito e desestabilização dos taludes marginais (SILVA, 1994).

Em algumas condições, as estradas podem ser projetadas de forma a ressaltar um recurso cênico que antes não era nitidamente reconhecido na região, e até mesmo pode servir de acesso a esse recurso (MOTTA, 1993).

### **2.3. Erosão**

A luta do homem contra a erosão é tão antiga quanto a própria agricultura, pois, quando houve a mudança do sistema nômade para um sistema de cultivo fixo, percebeu-se a necessidade de intensificar o uso do solo, o que levou à destruição da cobertura de sua superfície, expondo, dessa forma, o solo às forças erosivas (Assad et al., 1993, citados por FERNANDES, 1997).

De acordo com BERTONI e LOMBARDI NETO (1990), quaisquer que sejam as razões, é um fato indubitável que a erosão é um dos problemas mais prementes da humanidade; ela já arruinou milhões de hectares de terra antes cultiváveis e já reduziu muitos outros a uma situação definitivamente submarginal.

Nesse contexto, vários pesquisadores, em todas as partes do mundo, têm direcionado suas pesquisas para análise e quantificação dos sedimentos advindos da erosão, e os resultados são de fato preocupantes (FERNANDES, 1997).

No caso específico do Brasil, o cenário não é muito diferente. O Estado de São Paulo, apesar do seu grande desenvolvimento sócio-técnico-cultural, convive com uma perda de aproximadamente 194.000.000 de toneladas de solo agrícola por ano, e, destas, aproximadamente 25% (48.500.000 t/ano) chegam aos mananciais em forma de sedimentos transportados, causando assoreamento e poluição destes (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990).

Diante disso, pode-se afirmar com segurança que a erosão do solo é o perigo ambiental mais crítico dos tempos modernos, e suas principais implicações dizem respeito a degradação, principalmente do solo e da água, assoreamento e poluição dos recursos hídricos, prejuízos decorrentes para a saúde humana e animal, problemas de geração de energia, diminuição da disponibilidade de água para irrigação e abastecimento urbano, redução da produtividade agrícola, empobrecimento do meio rural, entre outras (FERNANDES, 1997).

Os estudos qualitativos sobre erosão são válidos para um zoneamento inicial de áreas suscetíveis a esse fenômeno. Entretanto, a não-quantificação das perdas de solo impossibilita uma análise mais aprofundada sobre o grau de degradação por erosão e o seu controle. Além disso, análises puramente qualitativas não permitem comparações de diferentes cenários de planejamento conservacionista, nem fornecem dados para estudos de sedimentação. Dessa forma, evidencia-se a necessidade de utilizar ferramentas que levem à quantificação da erosão, o que pode ser obtido através de alguns modelos preditivos (CHAVES, 1996).

### **2.3.1. Erosão hídrica**

A erosão pela água é um dos fenômenos geológicos mais comuns, tendendo a suavizar o relevo das superfícies expostas do globo terrestre. É conhecida como erosão natural e em consequência dela formam-se os depósitos sedimentares. Quando o homem rompe o equilíbrio estabelecido pela natureza, derrubando as florestas, passando a usar as terras, muitas vezes de maneira inadequada, ativando ou iniciando um processo rápido de desgaste do solo, a erosão passa a se chamar acelerada. A erosão acelerada se deve à ação dispersiva e ao poder transportador da água, que, como chuva, atinge a superfície do solo (impacto) e, escorrendo sobre ele sob a forma de enxurrada, transporta partículas sólidas (ASSIS, 1973).

Os principais tipos de erosão, de acordo com o aspecto apresentado pelos vestígios do transporte de solo, são: a erosão laminar, a erosão em sulcos e a erosão em voçorocas (ASSIS, 1973).

### **2.3.1.1. Erosão laminar**

A remoção de camadas delgadas de solo sobre toda uma área é a forma de erosão menos notada, e por isso a mais perigosa. As enxurradas tornam-se barrentas em dias de chuva. Os solos, por sua ação, tomam coloração mais clara, e a produtividade vai diminuindo progressivamente. É uma forma de erosão dificilmente perceptível, entretanto, em culturas perenes formadas em terrenos suscetíveis à erosão, pode-se perceber, após alguns anos, que as raízes, ao serem expostas, indicam a profundidade da camada de solo que foi arrastada (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990).

A água se move “morro abaixo” quando acumulada na superfície, e raramente se movimenta em uma lâmina uniforme sobre a superfície da terra; isso aconteceria se a superfície do solo fosse lisa e uniformemente inclinada, o que raramente pode acontecer, pois ela é quase sempre irregular. Cada pequena porção de água toma o caminho de menor resistência, concentrando em pequenas depressões e ganhando velocidade à medida que a lâmina de água e a declividade do terreno aumentam (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990).

A erosividade da enxurrada depende da sua velocidade, turbulência, quantidade e do tipo do material abrasivo que carrega. A velocidade aumenta com a quantidade de enxurrada e com o aumento da declividade do terreno; a turbulência da enxurrada aumenta com o aumento da intensidade de chuva; e a capacidade abrasiva da enxurrada depende da energia de escoamento da água e da quantidade e do tipo do material em suspensão na enxurrada. A quantidade do material transportado depende da capacidade de transporte da enxurrada, que é influenciada pelo tamanho, pela densidade e forma das partículas do solo e pelo efeito de retardamento da vegetação e de outras obstruções (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990).

### **2.3.1.2. Erosão em sulcos**

A erosão em sulcos resulta de pequenas irregularidades na declividade do terreno, que fazem com que a enxurrada, concentrando-se em alguns pontos do terreno, atinja volume e velocidade suficientes para formar riscos mais

ou menos profundos. Na sua fase inicial, os sulcos podem ser desfeitos com as operações normais de preparo do solo; em um estágio mais avançado, porém, eles atingem tal profundidade que interrompem o trabalho de máquinas agrícolas. Enquanto são desfeitos com as operações normais de preparo do solo, esses sulcos podem até não ser notados; o problema aparece quando eles resultam em sérios prejuízos para a produtividade do solo. Essa forma de erosão é ocasionada por chuvas de grande intensidade em terrenos de elevada declividade e em grandes lançantes (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990).

### **2.3.1.3. Erosão em voçorocas**

Este tipo de erosão é ocasionado por grandes concentrações de enxurrada que passam, ano após ano, no mesmo sulco, que vai se ampliando, pelo deslocamento de grandes massas de solo, e formando grandes cavidades em extensão e em profundidade. Exemplos da literatura mundial são citados com voçorocas de mais de uma centena de metro de comprimento e atingindo dezenas de metro de profundidade. A voçoroca é a visão impressionante do efeito da enxurrada descontrolada sobre a terra. Quando os diferentes horizontes do solo são de material de consistência uniforme, a voçoroca se desenvolve em paredes mais ou menos verticais, e se o material for muito friável, está sujeito a freqüentes desmoronamentos. Quando o material do subsolo ou de horizontes mais profundos é mais resistente que o horizonte superficial, as voçorocas apresentam as paredes em forma de V (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990).

Segundo ASSIS (1973), a erosão acelerada se manifesta com intensidade variável, condicionada pelos seguintes fatores: a) clima, b) solo, c) relevo, d) cobertura vegetal e e) uso da terra.

#### **a) Clima**

A influência do clima sobre a erosão acelerada faz-se sentir pela ação da temperatura, do vento e da chuva. A temperatura influi no grau de umidade do solo. A elevada temperatura favorece a evaporação e transpiração da água do solo, deixando-o mais seco e com maiores possibilidades de absorver a

água da chuva. A temperatura, também, pode determinar a natureza da precipitação: sob a forma de chuva, neve ou granizo. Os ventos, além de alterarem o ângulo de queda das gotas de água das chuvas contra a superfície do solo, lhes imprimem maior velocidade, aumentando o impacto das gotas contra a superfície do solo (ASSIS, 1973).

De acordo com ASSIS (1973), as chuvas precisam ser consideradas em termos de quantidade, intensidade e distribuição. A quantidade, ou seja, o volume total de uma chuva, exerce influência direta sobre a erosão, porque todos os solos apresentam um limite de capacidade de absorção. Ultrapassado tal limite, as águas logicamente passarão a escorrer sobre o terreno. As chuvas de volume pequeno raramente provocam enxurradas, ao passo que chuvas de grande volume saturam a terra e, conseqüentemente, formam maiores enxurradas. A intensidade da chuva refere-se à quantidade de água que cai em determinado tempo. Assim, se numa região ocorrerem duas chuvas de 50 mm, caindo uma em duas horas e a outra em dez horas, a primeira é mais intensa e ocasionará maior erosão que a segunda. Nesta última, o solo terá mais tempo para absorver a água e haverá menor formação de enxurrada. A distribuição das chuvas tem importância pelo fato de as terras cultivadas não se apresentarem igualmente protegidas e igualmente erodíveis durante as diferentes épocas do ano. Em terrenos arados e gradeados, as águas provocam maiores estragos que no mesmo terreno coberto com culturas ou vegetação natural.

A erosão hídrica é conseqüência da ação dispersiva e do poder transportador da água que cai sob a forma de chuva. Esta água completa na natureza um verdadeiro ciclo, denominado ciclo hidrológico. Neste, a fase mais importante se passa no solo. No ciclo hidrológico, parte da chuva evapora antes de atingir a superfície da terra, isto é, quando vai caindo ou depois de interceptada pela vegetação. Da chuva que atinge a superfície do solo, parte pode formar enxurrada e parte pode ser absorvida pelo solo. A água não absorvida, sob a forma de enxurrada, escoar até os lagos, reservatórios, fontes, rios e finalmente o oceano, posteriormente ocorrendo a evaporação para a atmosfera. A água absorvida pelo solo retorna à atmosfera através da evaporação direta, transpiração pela vegetação e evaporação dos lagos, rios ou oceanos que foram alimentados pelas águas subterrâneas (ASSIS, 1973).

## **b) Solo**

Segundo ASSIS (1973), a natureza do solo é um dos fatores que maior influência exercem sobre o volume das enxurradas e a quantidade de terra e de elementos nutritivos arrastados pela erosão, o que se deve à sua influência na penetração da água e na dispersão e no transporte de partículas. A influência do solo depende, pois, especialmente das suas características físicas, notadamente da textura, da estrutura e da drenagem interna. De modo geral, quanto mais arenosa for a textura de um solo, maiores serão as suas perdas em terra arrastada, e, inversamente, quanto mais rica em partículas finas, maior será a sua resistência à erosão.

No Estado de São Paulo, os maiores danos causados pela erosão concentram-se principalmente nos seguintes grandes grupos de solo: Latossolo Vermelho-Escuro – fase arenosa, Latossolo Vermelho-Amarelo – fase arenosa e solos Podzólicos dos municípios de Lins e Marília, não apenas pelas suas características arenosas, como também pela intensidade do seu uso agrícola (ASSIS, 1973).

## **c) Relevo**

Nos terrenos planos, praticamente a erosão não se manifesta, contudo, à medida que o relevo se torna mais acentuado, os perigos da erosão vão aumentando. No relevo devem ser considerados o comprimento da rampa, o grau de declive e a uniformidade da rampa, pois desses três atributos dependem o volume e a velocidade da enxurrada e, conseqüentemente, a erosão (ASSIS, 1973).

## **d) Cobertura vegetal**

A erosão do solo é dependente da sua cobertura vegetal. Terrenos com culturas de ciclo anual ficam mais tempo desprotegidos, principalmente na época do seu preparo para o plantio, contrariamente aos terrenos ocupados com culturas perenes. A influência da cobertura vegetal sobre a erosão faz-se sentir pela: interceptação das chuvas e proteção do solo contra o impacto

direto das gotas; maior facilidade de infiltração da água devido ao aumento da porosidade e granulação do solo, provocado pelas incorporações orgânicas e sistema radicular; e travamento do solo pelas raízes ou pela matéria orgânica que estrutura e aglutina as partículas do solo (ASSIS, 1973).

#### **e) Uso da terra**

Conforme ASSIS (1973), o modo como o homem está usando a terra, além de influenciar diretamente o processo erosivo, vai facilitar ou dificultar as medidas a serem tomadas para a sua conservação. Quando o uso da terra está ajustado à sua capacidade, os efeitos da erosão podem ser bastante diminuídos e, em alguns casos, completamente eliminados pela adoção de cuidados complementares, geralmente fáceis de aplicar e manter.

#### **2.3.2. Erosão nas estradas florestais**

A inadequada construção e planejamento da estrada florestal é a principal causa das erosões excessivas, provocadas por alteração do leito natural dos cursos d'água, greides acentuados e com inadequada rede de drenagem e grandes cortes e aterros (MACHADO e SOUZA, 1990).

O procedimento mais comum para prevenir danos provocados pela erosão na estrada florestal é controlar o escoamento superficial da água da chuva na faixa terraplenada da estrada (MACHADO e SOUZA, 1990). O escoamento superficial da água das chuvas, num mesmo sítio florestal, chega a ser três vezes menor antes da colheita florestal que após esta, incluindo nesse caso as estradas florestais de implantação (LIRA FILHO e SOUZA, 1991).

A água de escoamento superficial pode erodir a superfície da faixa terraplenada da estrada florestal e contribuir para sua instabilização. O principal fundamento de uma rede de drenagem é que ela deve interceptar, coletar e remover a água de escoamento subsuperficial e superficial das estradas florestais. A maioria dos problemas de drenagem pode ser controlada se forem evitados pontos topográficos e geológicos críticos, como: solo siltoso, curva vertical côncava, greides acentuados, locais de infiltração natural de água, nascentes, etc. (MACHADO e SOUZA, 1990).

Nas estradas, o processo de erosão do solo exposto se inicia pela terraplenagem e continua nos taludes de corte e aterro, nas sarjetas e nas pistas. Estradas mal drenadas acumulam água em seu leito e causam erosão (MACHADO e SOUZA, 1990). Os maiores riscos de danos ocorrem em terrenos acidentados, em solos naturalmente erosivos e instáveis, passíveis de desmoronamentos ou de deslizamentos de terra (ZIMMERMANN, 1983). A localização de estradas em terrenos instáveis aumenta os riscos de ocorrência de deslizamentos (PEARCE e STENZEL, 1972).

A implantação de cortes e aterros compactados implica necessariamente a execução de obras de drenagem, proteção superficial e contenção, de forma a garantir a estabilidade das estradas florestais, retardando os processos erosivos e de movimentação de massa, como escorregamento, rastejo de solo e queda de blocos ou detritos (FILHO et al., 1992).

O parcelamento do lançante é importante para o controle da erosão, usando-se diversas formas para reter a água aos poucos no terreno. Dentre essas várias formas estão as bacias de retenção (ACRA, 1984).

A produção de sedimentos das estradas florestais está correlacionada com tipo de solo, comprimento e inclinação da rampa, inclinação e altura dos taludes de corte e aterro (LUCE, 1993).

As principais causas dos danos ambientais, provocados pela implantação de estradas florestais, são provenientes da erosão do solo da faixa terraplenada (MEGAHAN, 1977). Em uma área de 75 e 10% de cobertura florestal, a erosão de um mesmo solo, sob a ação de uma mesma energia proveniente de uma precipitação, é igual a 100 e 10.000 kg/ha, respectivamente. Isso comprova a hipótese de que o controle da densidade da rede viária e o tamanho da faixa terraplenada da estrada florestal são fundamentais para a redução do impacto ambiental (TUCHY, 1982).

A erosão excessiva nas estradas florestais pode comprometer a trafegabilidade e exige elevados recursos financeiros para sua recuperação. Além disso, o material erodido é carregado para os cursos d'água, causando o assoreamento e seus peculiares danos ambientais (MEGAHAN, 1977).

Em estudos realizados por TUCHY (1982), o índice de erosão antes da abertura de uma estrada florestal era de 30 kg/ha/ano, subindo durante a abertura para 3.000 kg/ha/ano. Depois do término da implantação da estrada, o

índice de erosão baixou, após algum tempo, para 120 kg/ha/ano. Isso é um bom indicador de que, se não houver controle rigoroso, durante e após a execução do projeto de estradas florestais, pode-se aumentar em quase 3.000% o seu índice de erosão. Segundo o mesmo autor, o tempo teórico da erosão de um solo de floresta de 18 cm de profundidade é de 575.000 anos, mas o mesmo solo, sem a floresta, seria erodido em 18 anos.

Medições de produção e liberação de sedimentos de estradas florestais submetidas às condições de chuvas naturais têm sido feitas em alguns "sites". Notável entre esses estudos é o feito em Idaho Batholith e realizado por MEGAHAN e KIDD (1972). Suas observações incluem volume de erosão de uma estrada num período de seis anos. As medições foram feitas usando um sifão de sedimentos depositado nos córregos situados abaixo das estradas. MEGAHAN (1974) observou que, com o decorrer do tempo, o sedimento desses sifões decrescia ao longo de uma curva exponencial.

A construção de estradas promove a retirada da cobertura vegetal, movimentação do solo e compactação do seu leito, tornando essas vias muito vulneráveis à erosão causada pela chuva. Essa erosão será maior com o aumento da declividade e comprimento de rampa, fatores que aceleram a velocidade da enxurrada (DADALTO et al., 1990).

REID e DUNNE (1984) coletaram sedimentos de estradas florestais submetidas à chuva natural em Washington Ocidental durante um inverno. Eles inicialmente examinaram as relações entre intensidade de tráfego, superfície e produção de sedimentos. Suas observações incluíram volume de escoamento superficial e concentração de sedimentos durante eventos de chuva. No estudo foi constatado que a inclinação e o comprimento das rampas das estradas são inversamente correlacionados com as práticas de atividade de manejo. Portanto, não é possível fazer uma avaliação que independa do comprimento e da inclinação da rampa.

LUCE e BLACK (1997) determinaram como variações no comprimento e na inclinação das rampas de estradas afetam a produção de sedimentos e como variações na altura dos taludes de corte e textura do solo afetam essa produção. Também se procurou medir as diferenças na produção de sedimentos causadas pela remoção da vegetação das sarjetas. Nas estradas, com taludes de corte limpos (sem vegetação) e sarjetas vegetadas, submetidas a

três meses de inverno com alta intensidade de chuvas, constatou-se que a produção de sedimentos foi diretamente proporcional ao comprimento do segmento multiplicado pela inclinação elevada ao quadrado. Foi observado que a altura dos taludes de corte teve pequeno ou nenhum efeito na produção de sedimentos. Estradas com inclinação e comprimento moderados, construídas nos solos de granulometria fina, produziram nove vezes mais sedimentos que aquelas construídas nos solos de granulometria grossa. Estradas onde a vegetação dos taludes de corte e das sarjetas foi removida produziram sete vezes mais sedimentos que estradas onde a vegetação foi conservada.

Na Figura 1, utilizando-se o modelo de predição de erosão WEPP, foram determinados os efeitos das variações do comprimento e grau de declive na erosão da superfície da estrada (ELLIOT et al., 1997).

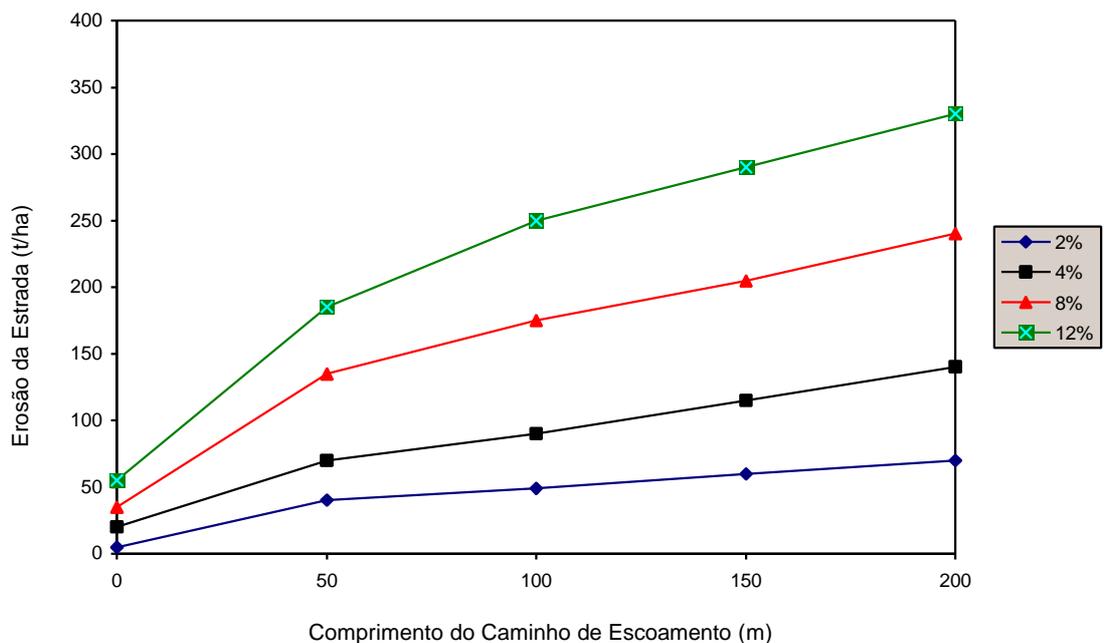


Figura 1 – Efeitos típicos do comprimento do caminho de escoamento nas taxas de erosão da estrada com um clima baseado em Campinas (Brasil), utilizando o modelo WEPP.

Segundo ELLIOT et al. (1997), o incremento na erosão do solo foi diretamente proporcional ao aumento da declividade e do comprimento da estrada.

O comprimento da rampa é um dos mais importantes fatores de erosão do solo. Observou-se que, quadruplicando o comprimento da rampa, as perdas

médias de terra por unidade de área quase triplicaram. Entretanto, dobrando o comprimento da rampa, as perdas de solo foram praticamente dobradas, porém as perdas por hectare não foram duplicadas. Concluiu-se que o parcelamento do lançante é importante para o controle da erosão, usando-se de diversas estruturas para reter a água disciplinadamente no terreno (BERTOLINI et al., 1993).

A impermeabilização da faixa central e a acumulação das águas nas margens das rodovias ocasionarão grande concentração da força destruidora e arrasadora do solo, impondo problemas aos responsáveis pela manutenção das vias de comunicação, ao danificarem acostamentos, taludes de cortes e aterros, e, conseqüentemente, à pista, além de prejuízos às áreas adjacentes, como voçorocas, grotas profundas, assoreamento de açudes, represas, lagos, riachos, etc. (BERTOLINI et al., 1993). As estradas, além de serem danificadas, servem de foco inicial para a erosão que se espalha e termina com o assoreamento dos recursos hídricos.

As estradas florestais são reconhecidas como uma das principais origens de sedimentos em muitas bacias hidrográficas florestadas. Os três efeitos dominantes das estradas florestais no ambiente são a alteração do escoamento superficial das bacias hidrográficas florestadas, a perda de massa e a erosão superficial (ELLIOT et al., 1997).

Nas bacias com alta capacidade de infiltração e onde o escoamento é predominantemente subsuperficial, as estradas têm o potencial de aumentar o escoamento superficial e interceptar o escoamento subsuperficial (WEMPLE, 1994). Mudanças nas propriedades hidrológicas de uma bacia hidrográfica freqüentemente mudarão os processos de sedimentação dos rios, podendo causar impactos como o alagamento de regiões ribeirinhas, o transbordamento de reservatórios e a destruição de pontes (ELLIOT et al., 1997).

Nas áreas íngremes, o fracasso da estabilidade do declive causado por altas intensidades de chuva pode levar a uma maior sedimentação nos rios que a erosão superficial (REID e DUNNE, 1984; MEGAHAN, 1987; MONTGOMERY, 1994). Em muitos casos, o tamanho da partícula do sedimento proveniente da instabilidade do declive pode ser muito maior que o da erosão superficial e pode incluir grandes pedras, que excedem um metro de diâmetro (ELLIOT et al., 1997).

De acordo com ELLIOT et al. (1997), a erosão do solo e a sedimentação são produtos das complexas interações entre solo, clima, topografia, cobertura vegetal e manejo. Nas estradas, a construção, a manutenção e o nível de tráfego influenciam a taxa de erosão.

### 2.3.2.1. Componentes da estrada

O número de componentes de uma estrada, o desenho e o manejo de cada componente podem influenciar a erosão da estrada ou a liberação de sedimentos desta para o recurso hídrico. A Figura 2 mostra os principais componentes da estrada que influenciam a erosão do solo (ELLIOT et al., 1997).

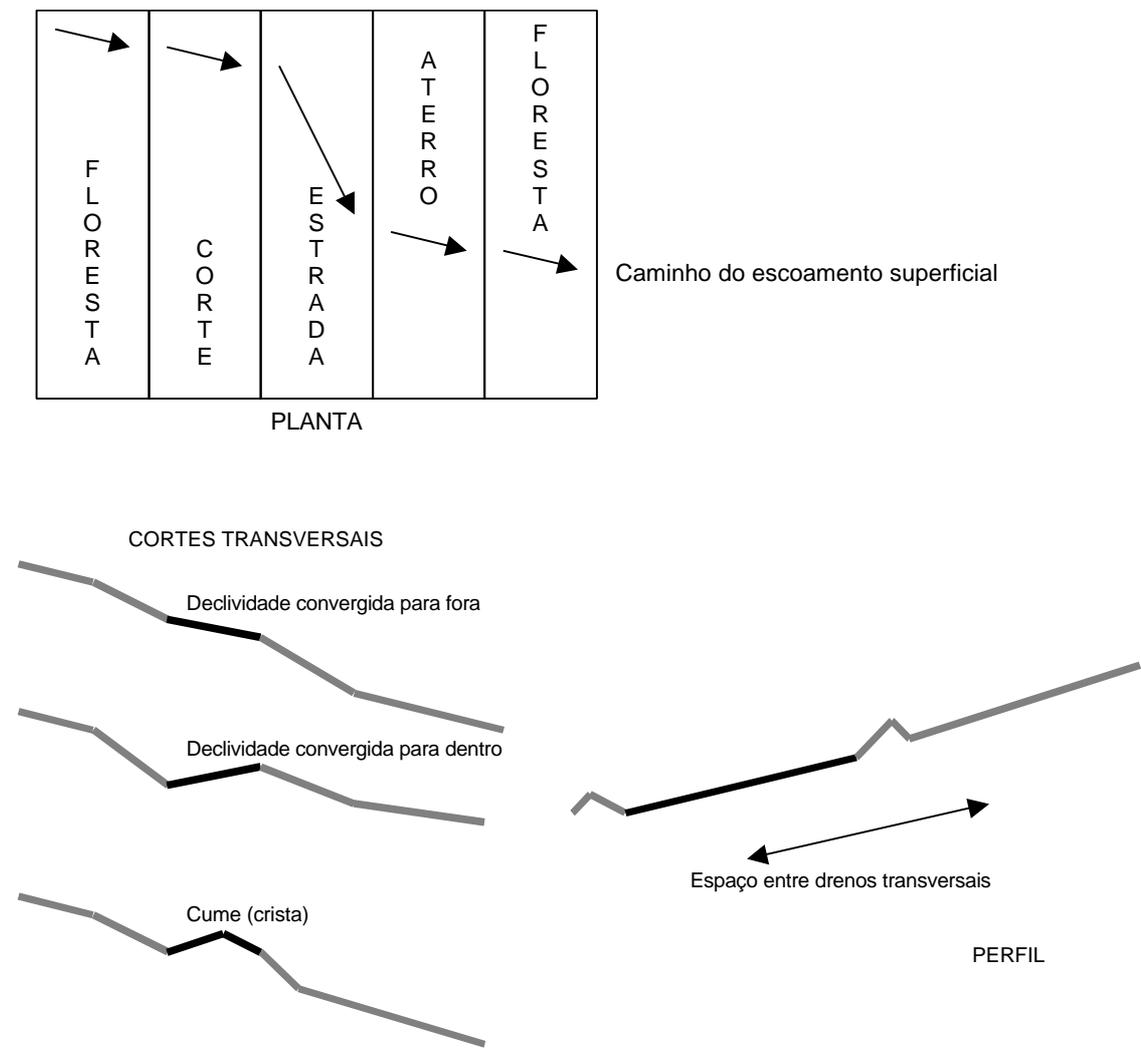


Figura 2 – Principais componentes de uma estrada.

O desenho e o manejo de uma estrada determinam o caminho de escoamento que a água segue para sair dela. Todas as estradas são projetadas para ter uma fundação compactada e para verter a água. Os principais modelos de cortes seccionais das estradas são: em crista (cume), declividade convergida para dentro da rampa e declividade convergida para fora da rampa. Em algumas estradas florestais, a erosão é limitada pela distância entre as obstruções de água. Um projetista de estrada pode adicionar cascalho, asfalto ou concreto na superfície para conter a erosão; pode também considerar métodos para limitar a erosão do escoamento superficial da estrada, adicionando cascalho nas sarjetas das estradas ou especificando que o dreno transversal leve a água para rampas convexas, onde esta se dissipará na superfície antes que incida num canal (ELLIOT et al., 1997).

### **2.3.2.2. Taxas de erosão das estradas**

As taxas de erosão das estradas são influenciadas: a) pelo caminho de escoamento (PACKER e CHRISTENSEN, 1977; FOLTZ, 1996); b) pelas propriedades de condutividade hidráulica do solo da estrada; e c) pela erodibilidade do solo (ELLIOT et al., 1994, 1995).

#### **a) Caminho de escoamento**

Segundo ELLIOT et al. (1997), o comprimento do caminho de escoamento depende da forma da estrada e da presença de sulcos formados pelas rodas. O menor caminho de escoamento ocorre numa estrada uniforme com rampa transversal uniforme. Nessa condição geométrica perfeita, o comprimento do caminho de escoamento aumenta com o aumento do declive da estrada. Uma estrada com 4 m de largura raramente terá comprimento do caminho de escoamento menor que 7 m para declives de 5% ou mais. Se as estradas recebem tráfego pesado, particularmente em clima chuvoso, os sulcos se formarão e a água seguirá preferencialmente os sulcos em vez de desviar para a margem interna ou externa da estrada. Com a formação dos sulcos, alguns benefícios da forma do desenho original da estrada são perdidos.

Os defensores da declividade convergida para dentro das estradas apontam os benefícios do controle da água numa sarjeta com saídas planejadas por baixo da superfície da estrada. A erosão na sarjeta pode ser minimizada pelo emprego de pedras não-erodíveis. O benefício da declividade convergida para fora das estradas é a dispersão do escoamento. Se a estrada torna-se sulcada, o formato não faz diferença, pois os sulcos terão escoamento concentrado e irão contornar estruturas de drenagem (HARTSOG e GONSIOR, 1973). Em geral, o formato mais correto de estrada depende das condições locais e do uso da estrada.

Os processos de declividade convergida para dentro da estrada foram estudados em detalhe, com dados de campo e através do modelo WEPP (TYSDAL et al., 1997). Geralmente, se as estradas têm boa manutenção, a maioria da erosão ocorre no lado de dentro da sarjeta (Figura 3).

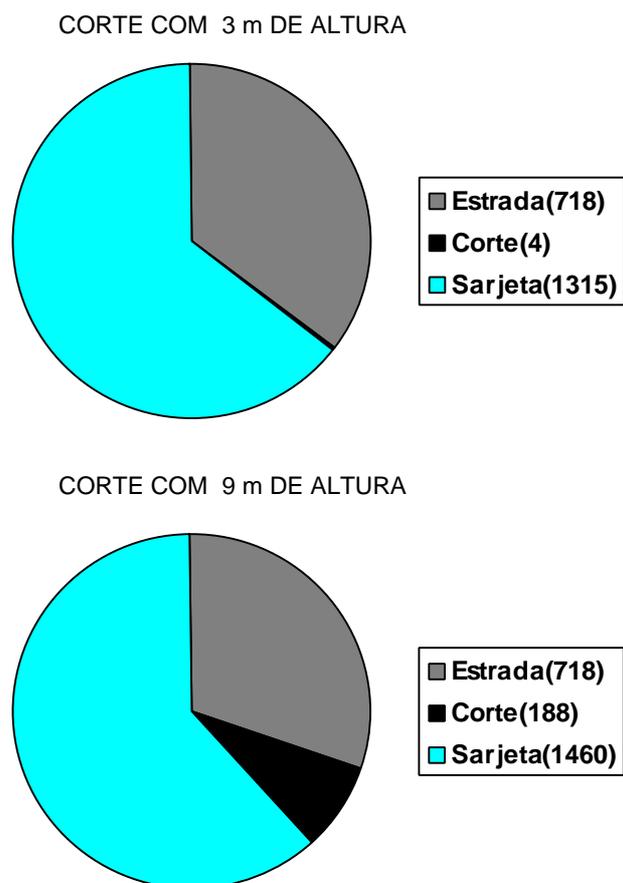


Figura 3 – Predição da produção de sedimentos, em kg/ano, provenientes da declividade convergida para dentro de uma estrada com 60 m de comprimento.

A contribuição do corte da estrada para a taxa de erosão é a menor, a menos que a sarjeta tenha sido manejada para reduzir erosão. A principal contribuição, no processo de erosão, do corte e da superfície da estrada está na produção de escoamento superficial, que pode então erodir a sarjeta (ELLIOT et al., 1997).

O escoamento concentrado causa mais erosão que o escoamento disperso. Os sulcos originados pelas rodas e as sarjetas são as causas principais do escoamento concentrado nas estradas florestais. Os sulcos das rodas são produzidos pelo tráfego de caminhões pesados nas estradas em condições de chuva. As sarjetas são construídas nas adjacências da estrada. A intensidade de tráfego é, provavelmente, o fator mais importante que afeta a produção de sedimentos (REID e DUNNE, 1984).

Numa estrada uniforme, a produção de sedimentos é aumentada para um fator 2 quando ocorre a formação de sulcos (BURROUGHS e KING, 1989). Em dois anos, comparando a produção de sedimentos em partes idênticas de estrada, em que a maior diferença foi a presença e a ausência de tráfego de caminhões, encontrou-se aumento na produção de sedimentos para um fator 9 com a presença do tráfego. Na simulação de tempestades de alta intensidade foi encontrada uma oscilação de duas a cinco vezes na produção de sedimentos para uma vasta classe de tipos de solo (FOLTZ, 1996).

Manter uma estrada livre de sulcos é uma técnica importante na redução da produção de sedimentos. O fechamento de estradas sazonais utilizadas para colheita pode ser mais efetivo que a manutenção destas com niveladora, evitando-se a formação dos sulcos em contraposição à remoção destes após sua formação (ELLIOT et al., 1997).

As sarjetas nas margens da estrada direcionam o escoamento superficial da estrada e dos cortes, causando escoamento concentrado. LUCE e BLACK (1997) apresentaram o primeiro ano de resultados dos efeitos de comprimento e declividade da estrada e altura dos cortes na produção de sedimentos. De um conjunto de dados obtidos de 74 parcelas situadas em Oregon (EUA), foi relatado que a condição da sarjeta é um importante determinante na produção de sedimentos no primeiro ano seguinte à construção. Além disso, encontrou-se relação estatística entre a produção total de sedimentos e o produto do quadrado da inclinação da estrada pelo comprimento do

segmento, fatores que têm sido mostrados e correlacionados bem nos estudos de erosão (McCOOL et al., 1989; NEARING, 1997). Não houve relação entre produção de sedimentos e altura do corte, indicando que o aumento na produção de sedimentos do corte não afeta a produção total de sedimentos da parcela. Em poucas parcelas, os severos distúrbios nos cortes sugerem que as condições dos cortes poderiam se tornar dominantes depois de alguns períodos de recobrimento, sendo na maior parte das vezes através do efeito dos sedimentos do corte na erodibilidade do fundo da sarjeta.

## **b) Condutividade hidráulica**

A condutividade hidráulica das estradas de superfície natural (estradas de terra) é mais baixa que de todos os solos, incluindo estradas cascalhadas, solos agrícolas ou solos florestais. A condutividade varia abaixo de 1 mm/h para uma estrada com superfície natural ou não-cascalhada para acima de 80 mm/h em uma floresta sem distúrbios. Essas diferenças são efeitos do manejo que tendem a dominar os efeitos de contribuição para diferenças nos solos. A presença de grande quantidade de vegetação e “litter” florestal é responsável pela alta capacidade de infiltração dos solos florestais sem distúrbios. As estradas são altamente compactadas, resultando em condutividades próximas de zero em todos os solos (LUCE, 1997; ELLIOT e HALL, 1997).

LUCE e CUNDY (1994) demonstraram que estradas sem cascalho têm condutividade da ordem de 0,1 a 0,5 mm/h, considerando que as estradas com cascalho têm condutividade da ordem de 3 mm/h (ELLIOT e HALL, 1997).

O Quadro 1 mostra a diferença entre as taxas de erosão de uma estrada, com superfície natural e superfície cascalhada, situada em Idaho (EUA) e Campinas (Brasil).

O cascalho, no noroeste dos Estados Unidos, reduz a predição de erosão por volta de 80%, contudo, no Brasil, o modelo prediz uma redução na erosão das estradas por volta de 30% (ELLIOT et al., 1997).

Quadro 1 – Impacto do cascalhamento na erosão de estradas com comprimento de 60 m, 4 m de largura e declividade de 12%, nos climas de Idaho (EUA) e Campinas (Brasil), utilizando o modelo WEPP

Impacto	Clima	
	Idaho (EUA)	Campinas (Brasil)
Precipitação Média Anual (mm)	822	1.361
Escoamento Superficial (mm)		
Superfície natural	450	1.046
Superfície cascalhada	78	681
Produção de sedimentos (kg)		
Superfície natural	2.312	4.868
Superfície cascalhada	432	3.348

### c) Erodibilidade

Para determinar o papel das propriedades do solo na erodibilidade das estradas, foi iniciada uma série de estudos coletando dados de campo de uma ampla classe de estradas com superfície natural. Desses estudos, vários pesquisadores (BURROUGHS et al., 1992; ULMAN et al., 1994; ELLIOT et al., 1995) determinaram que, nas estradas com superfície natural, a erodibilidade entre sulcos é similar aos solos de terras cultivadas e a erodibilidade em sulcos é similar aos solos de pastagens; e a condutividade é próxima a zero.

#### 2.3.2.3. Técnicas para mitigação da erosão

Segundo ELLIOT et al. (1997), as técnicas para mitigação da erosão em estradas incluem a redução na pressão dos pneus, a qualidade do agregado e o fechamento e a manutenção da estrada.

Em três anos de estudo nos Estados Unidos, FOLTZ (1995) observou que a produção de sedimentos decresceu por volta de 45% quando a pressão dos pneus foi reduzida de 620 kPa para 480 kPa em todos os eixos das rodas e por volta de 80% quando a pressão dos pneus foi reduzida de 480 kPa nos eixos das rodas de direção e 210 kPa (descarregado) ou 340 kPa (carregado) em todos os outros eixos.

FOLTZ e ELLIOT (1996) observaram que os processos de erosão ocorridos nesses locais mostraram que a redução na pressão dos pneus resultou em menor formação de sulcos. Com menor formação de sulcos, a água tende a correr através das margens das estradas; no entanto, se ela percorresse o caminho dos sulcos, causaria erosão de escoamento concentrado. Esses resultados têm sido bem recebidos pelos manejadores florestais, e alguns contratos de venda de madeira nos Estados Unidos agora incluem a redução na pressão dos pneus como um dos métodos para reduzir erosão nas estradas.

BURROUGHS e KING (1989) relataram que 150 mm de agregado de boa qualidade reduzem a produção de sedimento de uma estrada com superfície granítica por volta de 96%. SWIFT JR. (1984) verificou que a espessura do agregado foi importante. Uma profundidade de 50 mm não forneceu mitigação, enquanto uma profundidade de 200 mm forneceu 97% de mitigação. Nenhum desses estudos foi executado na presença de tráfego. FOLTZ e TRUEBE (1995), usando tráfego de caminhões carregados, constataram que a qualidade do agregado tem importante influência nas taxas de erosão do solo das estradas. Um agregado de qualidade marginal permitiu taxas de erosão de 4 a 17 vezes maiores que um agregado de boa qualidade. A ordem da taxa de erosão dependeu do tráfego e da precipitação. FOLTZ e ELLIOT (1996) acreditam que as diferenças são exatamente as mesmas dos efeitos observados para os impactos na pressão dos pneus e adição de cascalho, especialmente na condutividade e na presença de sulcos.

Os impactos de alteração do escoamento superficial e aumento da sedimentação fora do local de instalação das estradas têm conduzido para a remoção parcial ou completa dessas estradas, como uma prática freqüente na restauração das bacias hidrográficas pelo Serviço Florestal dos Estados Unidos. LUCE (1997) observou que a condutividade da estrada aumentou de 0 a 4 mm/h antes do fechamento para 20 a 40 mm/h depois do fechamento. A melhoria é modesta comparada com as condutividades existentes na floresta, mas pode conduzir para redução substancial no escoamento superficial em climas onde ocorrem baixas intensidades de precipitação. Segundo ELLIOT et al. (1996), o aumento na condutividade hidráulica proporcionou a saturação da estrada, diminuindo o risco de instabilidade desta.

#### **2.4. Modelo WEPP (“Water Erosion Prediction Project”)**

Os modelos de simulação, como os modelos matemáticos de predição de erosão, são ferramentas poderosas na pesquisa e nas práticas agrícolas, pois, aplicados em campo, esses modelos auxiliam na determinação das práticas conservacionistas e de manejos mais indicados para os diferentes cenários de aplicação (CHAVES, 1996). Se, entretanto, essas determinações usassem apenas resultados experimentais, elas seriam seriamente limitadas tanto em termos de custos e de tempo, como também pela imprevisibilidade da natureza (Ferreira e Smith, 1988, citados por FERNANDES, 1997).

Apesar de a descrição do processo erosivo ter sido feita de forma empírica há meio século, somente nos últimos 20 anos houve descrição mais física do fenômeno, por meio de equações e modelos baseados em processos. A principal vantagem desse tipo de enfoque é a representação mais detalhada do processo, permitindo melhor entendimento dos diferentes subprocessos envolvidos e sua inter-relação, bem como sua descrição quantitativa em níveis espacial e temporal (FOSTER e LANE, 1987).

Os modelos de erosão do solo são baseados em técnicas empíricas ou em processos. Nos métodos empíricos, como a USLE e RUSLE, os fatores que influenciam a erosão do solo são medidos e, então, descritos por uma equação matemática. Em contraste, os modelos baseados em processos descrevem a física do processo erosivo. Modelos empíricos requerem medições prévias dos locais de interesse ou locais similares. Modelos baseados em processos podem ser estendidos para locais sem medições com maior segurança (ELLIOT et al., 1997).

No entanto, a passagem dos modelos empíricos para os baseados em processos tem sido lenta e gradual, devido à ausência de dados adequados para o desenvolvimento de relações e para a estimativa de parâmetros (NEARING et al., 1989). Além disso, os requerimentos necessários para plena utilização desses modelos, como a facilidade de uso, as velocidades aceitáveis de processamento, a aplicabilidade a diferentes condições, a robustez e a precisão, foram recentemente alcançados. Isso vem ocorrendo pela disponibilidade de computadores mais eficientes e pelo desenvolvimento de programas

ambiciosos de modelagem, dentre os quais se destaca o projeto WEPP (CHAVES, 1996).

O modelo WEPP, por sua vez, representa a última geração de modelos baseados em processos. Visando substituir a USLE a médio prazo nos Estados Unidos, este modelo foi o resultado de um esforço multidisciplinar, envolvendo pesquisadores de várias agências e universidades americanas (CHAVES, 1996).

O modelo WEPP se baseia nos fundamentos das teorias de infiltração, física do solo, fitotecnia, hidráulica e mecânica da erosão. Proporciona várias vantagens sobre outras tecnologias de previsão de erosão, como a capacidade de estimar as distribuições espacial e temporal da perda de solo e deposição e perda de solo líquida na vertente ou em cada ponto dela, tanto em nível diário quanto mensal ou anual. Processos considerados pelo modelo incluem a geração estocástica de precipitação, o escoamento superficial, a evapotranspiração, a percolação, o crescimento de plantas, a decomposição de restos de colheita, entre outros (LANE e NEARING, 1989). Além da opção de simulação contínua, o modelo pode também ser usado na opção evento a evento (CHAVES, 1992).

A modelagem da erosão está na maior parte dos processos orientada e baseada no modelo WEPP (LAFLEN et al., 1997). Esse modelo não somente prediz taxas de erosão do solo, mas também a liberação de sedimentos. O Forest Service Research tem validado com sucesso o modelo WEPP para grande número de condições de estradas florestais (ELLIOT et al., 1997).

O projeto WEPP é constituído de três versões básicas: uma versão para vertentes (“hillslope version”), uma versão para bacias hidrográficas (“watershed version”) e uma versão de quadrícula (“grid version”) (CHAVES, 1992). Por se tratar de um modelo semideterminístico, o modelo WEPP também pode ser aplicado às condições brasileiras, desde que os arquivos de entrada de dados recebam adaptações e modificações para que reflitam as nossas condições (ANGULO FILHO et al., 1992).

### **2.4.1. Componentes do modelo WEPP**

O modelo WEPP pode ser dividido conceitualmente em seis componentes: geração de clima, hidrologia, crescimento de plantas, solos, erosão/deposição e irrigação (opcional) (CHAVES, 1992). Esses componentes serão descritos a seguir.

#### **2.4.1.1. Geração de clima**

Segundo CHAVES (1992), a geração de clima pode ser feita estocasticamente por um submodelo paralelo (CLIGEN), em que informações sobre volume, duração, intensidade e frequência de precipitação, temperaturas máxima e mínima, radiação solar e ponto de orvalho para a localidade de interesse são geradas e baseadas em séries históricas da estação meteorológica mais próxima. As informações geradas pelo submodelo CLIGEN são gravadas em um arquivo de clima, para posterior utilização pelo modelo WEPP. Dados reais de clima ou mesmo dados sintéticos podem também ser diretamente usados pelo modelo, sem a necessidade de utilização do CLIGEN.

#### **2.4.1.2. Hidrologia**

O componente hidrológico do modelo calcula a infiltração, o escoamento superficial e o balanço hídrico diário, incluindo a evapotranspiração e a percolação profunda. A infiltração é calculada pelo método de Green-Ampt modificado para intensidades variáveis de chuva e tempo de empoçamento. O escoamento superficial é estimado por meio da equação da onda cinemática para escoamento unidirecional, com solução analítica obtida pelo método das características (CHAVES, 1992).

#### **2.4.1.3. Crescimento de plantas**

De acordo com CHAVES (1992), o componente de crescimento de plantas estima o crescimento, a senescência das plantas e a decomposição dos restos culturais. No caso de culturas anuais, o crescimento das plantas é estimado em função do número de graus-dia e da umidade do solo.

#### 2.4.1.4. Solos

Muitos dos parâmetros de solo que são usados nos componentes hidrológico e de erosão (densidade, condutividade hidráulica, rugosidade superficial, parâmetros de erodibilidade) são dinâmicos, em função de operações de cultivo, consolidação, intemperismo e histórico da precipitação, e são reajustados automaticamente pelo modelo em função do tempo, das operações de cultivo e dos processos hidrológicos (CHAVES, 1992).

#### 2.4.1.5. Erosão

Segundo CHAVES (1992), o componente de erosão do modelo WEPP utiliza a equação permanente de continuidade de sedimento como base dos cálculos de erosão. A erosão do solo é dividida em erosão entre sulcos e erosão em sulcos. A primeira é causada pelo impacto das gotas de chuva sobre o solo, e a segunda se deve ao excesso da energia cisalhante do escoamento sobre a superfície. Além da desagregação, o modelo estima o seu transporte, e, quando houver mais sedimento do que a capacidade do escoamento em transportá-lo, ele passa a estimar a deposição.

#### 2.4.2. Equação de erosão utilizada pelo modelo WEPP

A equação básica para a erosão total é (FOSTER et al., 1989):

$$dG / dx = K_r (t - t_c) (1 - G/T_c) + K_i I^2$$

em que

$G$  (kg/m.s) = carga de sedimento em um ponto  $x$  (m) da encosta;

$K_r$  (s/m) = parâmetro de erodibilidade em sulcos;

$t$  (Pa) = tensão cisalhante atuando nas partículas de solo;

$t_c$  (Pa) = parâmetro de resistência ao cisalhamento;

$T_c$  (kg/m.s) = capacidade de transporte de sedimento do escoamento;

$K_i$  (kg/m<sup>4</sup>.s) = parâmetro de erodibilidade entre sulcos; e

$I$  (m/s) = intensidade da chuva.

Os parâmetros  $K_i$ ,  $K_r$  e  $t_c$  devem ser determinados experimentalmente para cada solo, através de experimentos em parcelas de perda de solo com chuva simulada, ou em parcelas com chuva natural; neste caso, por meio de técnicas de otimização.

O componente  $K_i R^2$  é a contribuição ao sulco das áreas entre sulcos (erosão entre-sulcos). A tensão cisalhante  $t$  é estimada pela equação  $t = P R S$ , em que  $P$  ( $N/m^3$ ) é o peso específico do escoamento numa dada seção,  $R$  (m) é o raio hidráulico e  $S$  (m/m) é a declividade média da seção. A capacidade de transporte ( $T_c$ ) é estimada por meio de uma simplificação da equação de Yalin, que utiliza, entre outros fatores, a tensão cisalhante ( $t$ ) sobre o solo.

Quando  $G > T_c$ , ou seja, quando houver condições de deposição no sulco, esta será estimada por:

$$dG / dx = (B V_f / q) (T_c - G)$$

em que

$B$  (adimensional  $\approx 0,5$ ) = coeficiente de turbulência induzida pelos impactos das gotas de chuva;

$V_f$  (m/s) = velocidade de sedimentação de uma certa classe (diâmetro) de sedimento; e

$q$  ( $m^2/s$ ) = vazão por largura unitária do sulco.

Os valores negativos obtidos na equação anterior indicam deposição.

Dessa forma, o modelo estimará os processos hidrossedimentológicos ocorrentes na vertente, prevendo, entre outros, o volume de escoamento superficial, a vazão de pico, a perda de solo e a deposição média na vertente, a perda e deposição máximas e suas posições, o aporte de sedimentos (que deixa a vertente) e a relação de enriquecimento de finos do sedimento. Essas previsões podem ser em nível de evento, média mensal ou média anual (CHAVES, 1992).

As previsões do modelo WEPP oferecem detalhamento bem maior do que a simples perda de solo média anual, como é o caso da maioria dos modelos de erosão. Esse detalhamento, por sua vez, permite ao planejador ou extensionista uma escolha e um dimensionamento mais seguro e preciso de práticas conservacionistas, além de dar indicações sobre os possíveis impactos

ambientais, devido ao aporte de sedimentos em áreas a jusante da vertente (CHAVES, 1992).

Mesmo sendo um modelo relativamente complexo, com cerca de 100.000 linhas de programa e mais de 100 sub-rotinas, o modelo WEPP realiza uma simulação anual típica em menos de 20 segundos, com os microcomputadores atualmente disponíveis. Estudos de validação do modelo, com dados de parcelas tipo USLE, indicam que ele representa eficazmente os principais mecanismos de erosão e sedimentação (NEARING et al., 1989).

Para utilização do modelo WEPP, parâmetros hidrológicos e de solo ( $K_i$ ,  $K_r$ ,  $t_c$  e  $V_f$ ) devem ser obtidos para a situação em questão. ELLIOT et al. (1989) levantaram estes e outros parâmetros para mais de 30 solos de diferentes regiões dos Estados Unidos, por meio de experimentos em parcelas de erosão em sulcos e entre sulcos. Esses parâmetros podem ser também obtidos por meio de otimização, usando-se dados de parcelas-padrão tipo USLE, conhecendo-se a pluviometria e as perdas de água e solo. Isso poderia facilitar sua aplicação no Brasil, uma vez que dados de parcelas de perda de solo-padrão são relativamente abundantes no País (CHAVES, 1996).

A calibração dos parâmetros de erodibilidade do modelo foi iniciada recentemente no Brasil, por meio de experimentos em parcelas de erosão em sulcos. Entretanto, cuidados devem ser tomados com relação à calibração dos parâmetros e à determinação dos valores das variáveis do modelo, inclusive em relação à sua distribuição espacial, em razão dos erros a eles associados. Em uma análise de incerteza do modelo WEPP, CHAVES e NEARING (1991) concluíram que as incertezas inerentes aos parâmetros e às variáveis do modelo se propagam de forma significativa até as predições, com propagação média de erro de 400%, afetando principalmente os valores mais baixos de perda de solo. Isso se deve em parte à alta não-linearidade das equações do modelo, aliada à natureza booleana de sua estrutura.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Localização**

O experimento foi realizado no projeto de reflorestamento, povoamento de *Pinus caribaea* e *Pinus oocarpa*, pertencente à tipologia de maciços florestais homogêneos, situado na Empresa Duratex – Fazenda Monte Alegre, em Agudos, no período de julho de 2000 a março de 2001. Agudos localiza-se no Estado de São Paulo (Figura 4), entre as coordenadas geográficas 22°15' e 22°30' de latitude sul e 48°45' e 49°00' de longitude oeste, com altitude média de 550 m.

A área de estudo apresenta relevo predominantemente plano e o solo é caracterizado como Latossolo Vermelho-Escuro fase arenosa. De acordo com a classificação de Köppen, o clima característico da região é do tipo CWA, mesotérmico de inverno seco e verão chuvoso, com temperatura média anual de 21,9 °C e precipitação média mensal de 123 mm.

#### **3.2. Componentes**

No experimento foram avaliados o volume total de água escoada e a produção de sedimentos provenientes das estradas florestais submetidas às condições de chuva natural.

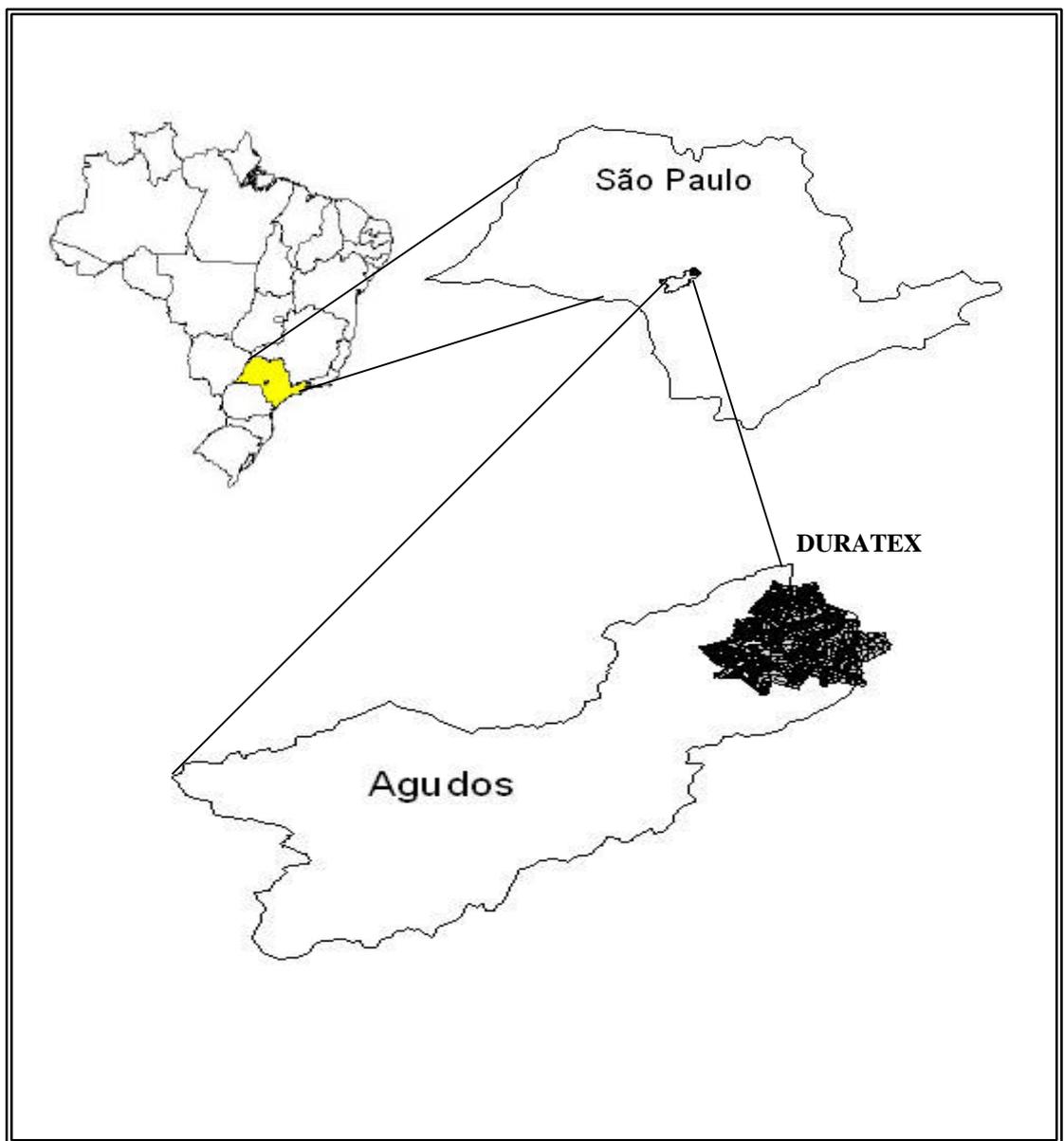


Figura 4 – Localização geográfica da área experimental.

Os levantamentos foram realizados em solo granular (menos de 35% do solo passa na peneira de 0,074 mm), constituído, na maior parte, por areia fina (40%) e média (43%), com teor de argila, silte e pedras da ordem de 12, 5 e 0%, respectivamente. A densidade do solo nos segmentos de estrada foi de  $1.962 \text{ g/cm}^3$ , e o teor de umidade ótimo, de 10,36%. A taxa de infiltração encontrada foi de 10% do total de precipitação.

As inclinações dos segmentos de 1 e 7% foram analisadas, enquanto os comprimentos variaram de 20 a 40 m, com 4 m de largura.

Os segmentos de estrada foram delimitados com tábuas de 0,30 m de largura, envolvidas em lona plástica, evitando, dessa forma, contribuição da água escoada e sedimentos das áreas vizinhas e que o material erodido do segmento extravasasse seu limite (Figura 5). Foram feitas canaletas nas laterais externas das parcelas, visando o desvio do excesso de enxurrada para locais vizinhos.

Para determinação da quantidade do material erodido foram instalados tambores coletores localizados na parte inferior das estradas, onde foram inseridas tubulações de PVC de 2 polegadas, para coleta dos sedimentos provenientes da estrada propriamente dita (Figura 6). As dimensões dos tambores foram de 0,57 m de diâmetro, conseqüentemente, 0,285 m de raio. A partir do quadrado do raio multiplicado por  $\pi$ , determinou-se a superfície do tambor de  $0,255 \text{ m}^2$ .

Os tambores foram marcados com tinta amarela à prova d'água e em cada tambor foi inscrita uma letra seguida de um número, identificando, respectivamente, a declividade e o comprimento da parcela e a repetição a que se referia, além do número do tambor representando a localização deste (T1, T2 ou T3). Os tambores situados na declividade de 1% receberam a letra A nos segmentos de 20 m e letra B nos segmentos de 40 m; já aqueles situados na declividade de 7% receberam a letra C nos segmentos de 20 m e letra D nos segmentos de 40 m. Em cada parcela foram utilizados três tambores, conforme dimensionamento calculado para coleta do material erodido. A numeração foi feita partindo-se do tambor mais próximo da parcela, que recebeu o número 1, o intermediário, com o número 2, e o mais distante da parcela recebeu o número 3.



Figura 5 – Delimitação do segmento de estrada.



Figura 6 – Instalação dos tambores coletores.

Para instalação dos tambores coletores, com o auxílio de retroescavadeira, foram feitas valas de 1,20 m de largura, 30 m de comprimento e 1,60 m de profundidade. Os tambores foram assentados nessas valas, com desnível da parte superior do tambor em relação à parcela de 0,10 m para o primeiro tambor, 0,15 m para o segundo tambor e 0,20 m para o terceiro tambor.

Nos tambores coletores foram feitos orifícios nivelados e perfeitamente iguais, posicionados a 0,60 m do fundo do primeiro tambor e a 0,65 m do fundo do segundo tambor, que funcionaram como um divisor Geib. Nas parcelas de 20 e 40 m de comprimento foram feitos cinco e sete orifícios, respectivamente, no primeiro e segundo tambores. O terceiro tambor foi utilizado para coletar o excedente da enxurrada proveniente do segundo tambor. Os tambores foram ligados em série através de cano PVC de 2 polegadas (Figura 7).



Figura 7 – Disposição dos tambores coletores.

Na lateral inferior dos tambores foi colocado um dreno, para facilitar o esvaziamento e a posterior limpeza destes.

No segmento de estrada de  $80 \text{ m}^2$ , o primeiro tambor recebeu o volume total de enxurrada proveniente da parcela. Desse total, uma alíquota de  $1/5$  foi coletada no segundo tambor e o restante ( $4/5$ ) retornou ao ambiente. Da mesma forma,  $1/5$  do volume excedente do segundo tambor foi coletado no terceiro tambor e o restante ( $4/5$ ) retornou ao ambiente.

No segmento de estrada de  $160 \text{ m}^2$ , o primeiro tambor recebeu o volume total de enxurrada proveniente da parcela. Desse total, uma alíquota de  $1/7$  foi coletada no segundo tambor e o restante ( $6/7$ ) retornou ao ambiente. Da mesma forma,  $1/7$  do volume excedente do segundo tambor foi coletado no terceiro tambor e o restante ( $6/7$ ) retornou ao ambiente.

Para cada inclinação e comprimento do segmento de estrada foi coletado o material erodido proveniente de um evento de chuva natural. Os dados de volume e intensidade de precipitação diária foram obtidos com a instalação de pluviômetro e pluviógrafo no local.

O período de coleta de dados foi de um ano, concentrando-se na época das chuvas.

Posteriormente, os arquivos de clima, precipitação, solo, inclinação e comprimento do segmento foram introduzidos e adaptados ao modelo de previsão de erosão WEPP, com o propósito de dar validação a este, visando a confecção de um modelo apropriado às condições florestais brasileiras.

### **3.3. Dimensionamento do sistema coletor**

A precipitação máxima utilizada para dimensionamento do sistema coletor foi estipulada de acordo com as precipitações máximas dos últimos 10 anos para a região em questão, evitando-se um superdimensionamento, que tornaria o projeto economicamente inviável. Após criterioso exame, foi selecionada, para os cálculos, a precipitação de 0,073 m.

O coeficiente de enxurrada ou de escoamento selecionado foi de 0,90 (AZEVEDO NETTO e ALVAREZ, 1994), sendo o mais indicado para condições de estradas asfaltadas, proporcionando dessa forma maior segurança ao experimento. Esse coeficiente sugere que, do volume total de chuva que incide sobre a estrada, 90% é escoado e o restante (10%) é infiltrado no perfil do terreno.

O volume máximo de enxurrada possível de ocorrer, com a segurança desejada, na parcela de 80 m<sup>2</sup> foi dado pelo produto entre a área da parcela (80 m<sup>2</sup>), a precipitação máxima selecionada (0,073 m) e o coeficiente de enxurrada (0,90), totalizando 5,256 m<sup>3</sup>.

O volume útil do primeiro tambor foi dado pelo produto entre a superfície do tambor (0,25518 m<sup>2</sup>) e a profundidade útil deste (0,60 m), encontrando-se 0,15311 m<sup>3</sup>.

Subtraindo o volume útil do primeiro tambor (0,15311 m<sup>3</sup>) do volume total de 5,256 m<sup>3</sup>, encontrou-se 5,10289 m<sup>3</sup>, que necessitariam ser armazenados. Através do fracionamento utilizado, o total a ser armazenado no

segundo tambor foi dividido entre os cinco orifícios do primeiro tambor, totalizando  $1,02058 \text{ m}^3$ .

O volume útil do segundo tambor foi dado pelo produto entre a superfície do tambor ( $0,25518 \text{ m}^2$ ) e a profundidade útil deste ( $0,65 \text{ m}$ ), encontrando-se  $0,16587 \text{ m}^3$ .

Subtraindo o volume útil do segundo tambor ( $0,16587 \text{ m}^3$ ) do volume total de  $1,02058 \text{ m}^3$ , encontrou-se  $0,85471 \text{ m}^3$ , que necessitariam ser armazenados. Através do fracionamento utilizado, o total a ser armazenado no terceiro tambor foi dividido entre os cinco orifícios do segundo tambor, totalizando  $0,17094 \text{ m}^3$ .

O volume útil do terceiro tambor foi dado pelo produto entre a superfície do tambor ( $0,25518 \text{ m}^2$ ) e a profundidade útil deste ( $0,75 \text{ m}$ ), encontrando-se  $0,19139 \text{ m}^3$ .

Conforme os cálculos apresentados anteriormente, o sistema coletor da parcela de  $80 \text{ m}^2$  foi adequadamente dimensionado, visto que o volume útil do terceiro tambor ( $0,19139 \text{ m}^3$ ) foi superior ao volume a ser armazenado ( $0,17094 \text{ m}^3$ ).

O volume máximo de enxurrada possível de ocorrer, com a segurança desejada, na parcela de  $160 \text{ m}^2$  foi dado pelo produto entre a área da parcela ( $160 \text{ m}^2$ ), a precipitação máxima selecionada ( $0,073 \text{ m}$ ) e o coeficiente de enxurrada ( $0,90$ ), totalizando  $10,5120 \text{ m}^3$ .

O volume útil do primeiro tambor foi dado pelo produto entre a superfície do tambor ( $0,25518 \text{ m}^2$ ) e a profundidade útil deste ( $0,60 \text{ m}$ ), encontrando-se  $0,15311 \text{ m}^3$ .

Subtraindo o volume útil do primeiro tambor ( $0,15311 \text{ m}^3$ ) do volume total de  $10,5120 \text{ m}^3$ , encontrou-se  $10,3589 \text{ m}^3$ , que necessitariam ser armazenados. Através do fracionamento utilizado, o total a ser armazenado no segundo tambor foi dividido entre os sete orifícios do primeiro tambor, totalizando  $1,47984 \text{ m}^3$ .

O volume útil do segundo tambor foi dado pelo produto entre a superfície do tambor ( $0,25518 \text{ m}^2$ ) e a profundidade útil deste ( $0,65 \text{ m}$ ), encontrando-se  $0,16587 \text{ m}^3$ .

Subtraindo o volume útil do segundo tambor ( $0,16587 \text{ m}^3$ ) do volume total de  $1,47984 \text{ m}^3$ , encontrou-se  $1,31397 \text{ m}^3$ , que necessitariam ser

armazenados. Através do fracionamento utilizado, o total a ser armazenado no terceiro tambor foi dividido entre os sete orifícios do segundo tambor, totalizando  $0,18771 \text{ m}^3$ .

O volume útil do terceiro tambor foi dado pelo produto entre a superfície do tambor ( $0,25518 \text{ m}^2$ ) e a profundidade útil deste ( $0,75 \text{ m}$ ), encontrando-se  $0,19139 \text{ m}^3$ .

Conforme os cálculos apresentados anteriormente, o sistema coletor da parcela de  $160 \text{ m}^2$  foi adequadamente dimensionado, visto que o volume útil do terceiro tambor ( $0,19139 \text{ m}^3$ ) foi superior ao volume a ser armazenado ( $0,18771 \text{ m}^3$ ).

### **3.4. Coleta dos dados**

A coleta dos dados foi feita no dia seguinte a cada evento de chuva. Inicialmente era feita a leitura no pluviômetro e anotada em caderneta de campo apropriada, contendo data, hora, responsável pela leitura e as adversidades ocorridas.

Posteriormente era feita a coleta propriamente dita, partindo-se do terceiro tambor para o primeiro, com o intuito de evitar que o material depositado fosse desviado, com a homogeneização, para os tambores subseqüentes.

Inicialmente, o tambor era destampado e a altura do nível da água anotada (Figura 8). O material depositado nos tambores coletores foi homogeneizado, para retirada de uma amostra representativa de  $100 \text{ ml}$  (Figuras 9 e 10). As amostras foram depositadas em garrafas plásticas, hermeticamente fechadas, contendo a identificação exata do tambor de origem e a data de coleta (Figura 11). Após a coleta, os tambores eram esvaziados e limpos com espuma absorvente, para retirada do resíduo depositado no fundo destes, e novamente tampados, para futuras coletas.

Após cada dia de coleta, as garrafas plásticas eram encaminhadas para o laboratório de análise de solos, onde o material era também homogeneizado, sendo retirados  $50 \text{ ml}$  para secagem em estufa a uma temperatura de  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  no período de 24 horas. Após transcorrido esse período, as amostras permaneciam por uma hora em temperatura ambiente, para determinação do peso do resíduo em balança de precisão.



Figura 8 – Medição da altura do nível da água.



Figura 9 – Homogeneização do material depositado nos tambores coletores.



Figura 10 – Retirada da amostra de 100 ml do material homogeneizado.



Figura 11 – Amostras de 100 ml reservadas em garrafas plásticas, para posterior determinação do peso do solo.

### **3.5. Interpretação dos resultados**

O volume recolhido no terceiro tambor multiplicado pelo número de orifícios do segundo tambor, acrescido ao volume depositado no segundo tambor multiplicado pelo número de orifícios do primeiro tambor e posteriormente acrescido ao volume depositado no primeiro tambor, forneceu o volume total escoado do talhão experimental em um evento de chuva.

O peso do sedimento encontrado na amostra de 50 ml do terceiro tambor foi relacionado com o volume total desse tambor (volume do terceiro tambor multiplicado pelo número de orifícios do segundo tambor), acrescido ao peso do sedimento encontrado na amostra de 50 ml do segundo tambor relacionado com o volume total desse tambor (volume do segundo tambor multiplicado pelo número de orifícios do primeiro tambor), acrescido ao peso do sedimento encontrado na amostra de 50 ml do primeiro tambor relacionado com o volume total desse tambor, forneceu o peso total de sedimento do talhão experimental em um evento de chuva.

### **3.6. Validação do modelo WEPP**

Os dados de solo, como tipo de solo, porcentagem de argila, silte, areia e pedras, densidade, teor de umidade ótimo e taxa de infiltração, foram fornecidos ao IAC (Instituto Agrônomo de Campinas), onde as previsões de perda de água (volume de enxurrada) e perda de solo (peso de solo) foram geradas pelo modelo WEPP. Os dados de clima do Estado de São Paulo foram utilizados nas previsões. A precipitação total foi determinada pelo somatório das precipitações observadas no experimento. As previsões foram determinadas para os segmentos de estrada de 20 e 40 m de comprimento, nas inclinações de 1 e 7%.

Posteriormente, foram feitas comparações entre os dados observados e aqueles preditos pelo modelo WEPP.

### **3.7. Delineamento estatístico**

O experimento foi instalado no delineamento inteiramente casualizado, em parcela subdividida, com quatro repetições, totalizando 16 unidades experimentais. As parcelas foram constituídas por dois comprimentos (20 e 40 m) e duas declividades (1 e 7%), e as subparcelas, por 14 precipitações (7, 8, 9, 10, 14, 19, 20, 22, 28, 43, 48, 64, 65 e 79 mm).

Os dados de volume de enxurrada e peso do solo foram submetidos à análise de variância e teste F a 1% de probabilidade. Os comprimentos e as declividades foram comparados pelo teste F ( $P < 0,01$ ). O efeito da precipitação

foi estudado por meio de análise de regressão, e a escolha do melhor modelo foi feita com base no coeficiente de determinação e na significância dos coeficientes de regressão, pelo teste t ( $P < 0,01$ ).

Para cada comprimento e cada declividade, foi estudada a relação entre o peso do solo e o volume de enxurrada, por meio de análise de regressão.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Análise de variância

As análises de variância do volume de enxurrada e do peso do solo são demonstradas no Quadro 2.

Quadro 2 – Resumo da análise de variância do volume de enxurrada e do peso do solo em diferentes comprimentos, 20 e 40 m, e declividades do segmento, 1 e 7%, nas 14 precipitações observadas, com quatro repetições

Fonte de Variação	Grau de Liberdade	Quadrado Médio	
		Volume de enxurrada	Peso do solo
Comprimento (C)	1	5.473.196,00 **	28,0295 **
Declividade (D)	1	307.900,50 <sup>ns</sup>	64,4031 **
C x D	1	156,28 <sup>ns</sup>	7,1431 *
Resíduo A	12	156.721,00	1,0029
Precipitação (P)	13	5.139.676,00 **	17,1176 **
C x P	13	182.318,40 **	1,8393 **
D x P	13	54.987,47 <sup>ns</sup>	3,9121 **
C x D x P	13	43.672,57 <sup>ns</sup>	0,7692 **
Resíduo B	156	34.276,36	0,3228
CV parcela (%)		51,45	84,47
CV subparcela (%)		24,06	47,99

\*\* F significativo a 1% de probabilidade.

\* F significativo a 5% de probabilidade.

<sup>ns</sup> F não-significativo a 5% de probabilidade.

Pode-se observar, no Quadro 2, que o volume de enxurrada foi influenciado por diferenças no comprimento, na precipitação e na interação do comprimento com a precipitação. As diferenças na declividade e nas interações da declividade com o comprimento, da declividade com a precipitação e da declividade com o comprimento e a precipitação não influenciaram o volume de enxurrada. O peso do solo foi influenciado por diferenças no comprimento, na declividade, na precipitação e em suas respectivas interações (comprimento x declividade, comprimento x precipitação, declividade x precipitação e comprimento x declividade x precipitação).

#### **4.2. Médias do volume de enxurrada e peso do solo**

Os valores de volume de enxurrada nas precipitações de 7, 8, 9, 10, 14, 19, 20, 22, 28, 43, 48, 64, 65 e 79 mm, com os respectivos comprimentos do segmento, 20 e 40 m, e declividades, 1 e 7%, estão listados no Quadro 3.

Pode-se observar no Quadro 3 que, a partir da precipitação de 7 mm até 19 mm, não houve diferença significativa no volume de enxurrada quando se variou o comprimento do segmento (20 e 40 m) e a declividade (1 e 7%). Isso se deve ao fato de que a quantidade, ou seja, o volume total de uma chuva, exerce influência direta sobre a erosão, pois todos os solos apresentam um limite de capacidade de absorção; ultrapassado esse limite, as águas passarão a escorrer sobre o terreno. As chuvas de pequeno volume raramente provocam enxurradas, ao passo que chuvas de grande volume saturam a terra e, conseqüentemente, formam maiores enxurradas (ASSIS, 1973). Nas menores precipitações, a taxa de infiltração é mais significativa que a taxa de escoamento.

A variação na declividade influenciou significativamente o volume de enxurrada no comprimento do segmento de 20 m para as precipitações de 22 e 28 mm e no comprimento do segmento de 40 m para a precipitação de 65 mm.

As observações supracitadas podem ser explicadas pela distribuição irregular das precipitações ao longo do trecho experimental e pela variação na intensidade da precipitação, ocasionando alterações no volume de enxurrada. Uma precipitação de elevada intensidade incidindo sobre um segmento de estrada de maior declividade terá menos tempo para infiltrar no perfil do terreno, ocasionando maior escoamento superficial e, conseqüentemente,

volume de enxurrada mais significativo, quando comparado com um segmento de mesmo comprimento e declividade menor.

A variação no comprimento não influenciou significativamente o volume de enxurrada na declividade de 7% para a precipitação de 28 mm e na declividade de 1% para a precipitação de 79 mm.

Quadro 3 – Volume médio de enxurrada, em litros, nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, nas 14 precipitações observadas

Precipitação	Comprimento (m)	Declividade		Média
		1%	7%	
7	20	34,32 <b>Aa</b>	123,00 <b>Aa</b>	78,66
	40	67,49 <b>Aa</b>	129,95 <b>Aa</b>	98,72
8	20	103,99 <b>Aa</b>	153,94 <b>Aa</b>	128,96
	40	253,84 <b>Aa</b>	218,50 <b>Aa</b>	236,17
9	20	28,26 <b>Aa</b>	112,34 <b>Aa</b>	70,30
	40	69,92 <b>Aa</b>	112,29 <b>Aa</b>	91,10
10	20	161,02 <b>Aa</b>	120,89 <b>Aa</b>	140,95
	40	160,06 <b>Aa</b>	153,87 <b>Aa</b>	156,97
14	20	310,68 <b>Aa</b>	265,70 <b>Aa</b>	288,19
	40	582,06 <b>Aa</b>	432,46 <b>Aa</b>	507,26
19	20	162,42 <b>Aa</b>	321,78 <b>Aa</b>	242,10
	40	445,09 <b>Aa</b>	435,40 <b>Aa</b>	440,24
20	20	638,90 <b>Ab</b>	793,92 <b>Ab</b>	716,41
	40	1106,76 <b>Aa</b>	1258,59 <b>Aa</b>	1182,68
22	20	419,38 <b>Bb</b>	827,09 <b>Ab</b>	623,23
	40	1054,07 <b>Aa</b>	1205,90 <b>Aa</b>	1129,98
28	20	294,98 <b>Bb</b>	721,51 <b>Aa</b>	508,25
	40	716,03 <b>Aa</b>	847,76 <b>Aa</b>	781,89
43	20	950,72 <b>Ab</b>	944,47 <b>Ab</b>	947,60
	40	1594,19 <b>Aa</b>	1460,88 <b>Aa</b>	1527,54
48	20	1192,95 <b>Ab</b>	1110,34 <b>Ab</b>	1151,64
	40	1522,06 <b>Aa</b>	1639,95 <b>Aa</b>	1581,01
64	20	1184,02 <b>Ab</b>	1225,16 <b>Ab</b>	1204,59
	40	1641,29 <b>Aa</b>	1791,33 <b>Aa</b>	1716,31
65	20	1291,83 <b>Ab</b>	1372,85 <b>Ab</b>	1332,34
	40	1672,10 <b>Ba</b>	1971,64 <b>Aa</b>	1821,87
79	20	1279,39 <b>Aa</b>	1021,34 <b>Ab</b>	1150,37
	40	1568,06 <b>Aa</b>	1809,20 <b>Aa</b>	1688,63

Em cada precipitação e cada comprimento (linha), A difere de B pelo teste F (P<0,05).  
Em cada precipitação e cada declividade (coluna), a difere de b pelo teste F (P<0,05).

As observações anteriores podem ser explicadas pela distribuição irregular e variação na intensidade das precipitações. A intensidade da precipitação influencia significativamente o volume de enxurrada. Nas precipitações de menor intensidade, pode-se observar que o escoamento superficial é menor quando comparado com precipitações de maior intensidade, visto que a infiltração da água no perfil do terreno é mais significativa naquela situação. Nesse caso, a variação no comprimento do segmento não interfere significativamente no volume de enxurrada.

Os valores de peso do solo, nas precipitações de 7, 8, 9, 10, 14, 19, 20, 22, 28, 43, 48, 64, 65 e 79 mm, com os respectivos comprimentos do segmento, 20 e 40 m, e declividades, 1 e 7%, estão listados no Quadro 4.

A velocidade de enxurrada influencia significativamente a quantidade de sedimento transportado, ou seja, quanto maior a declividade e o comprimento do segmento, maior será a velocidade da enxurrada e, conseqüentemente, a quantidade de material transportado (DADALTO et al., 1990). À medida que a precipitação aumenta, ocorre incremento no volume de enxurrada e, por conseguinte, na perda de solo.

No Quadro 4 pode-se observar esse comportamento, exceto nas precipitações a partir de 7 até 19 mm, em que a taxa de infiltração é mais significativa que a taxa de escoamento superficial, fazendo com que as variações de declividade e comprimento do segmento não apresentassem diferença significativa nos valores de peso do solo.

Conforme os dados do Quadro 3, na precipitação de 7 mm, o volume de enxurrada na declividade de 1% e no comprimento do segmento de 40 m foi 96,65% superior ao comprimento de 20 m, apresentando 67,49 e 34,32 litros, respectivamente. Na declividade de 7%, o volume de enxurrada no segmento de estrada de 40 m foi 5,65% superior ao do segmento de 20 m, com 129,95 e 123,00 litros, respectivamente. No comprimento do segmento de 20 m, o volume de enxurrada na declividade de 7% foi 258,39% superior àquele na declividade de 1%, apresentando 123,00 e 34,32 litros, respectivamente. No comprimento do segmento de 40 m, o volume de enxurrada na declividade de 7% foi 92,55% superior ao da declividade de 1%, apresentando 129,95 e 67,49 litros, respectivamente. As diferenças citadas não foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. Esses dados estão plotados na Figura 12.

Quadro 4 – Peso médio do solo, em kg, nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, nas 14 precipitações observadas

Precipitação	Comprimento (m)	Declividade		Média
		1%	7%	
7	20	0,015 <b>Aa</b>	0,150 <b>Aa</b>	0,083
	40	0,032 <b>Aa</b>	0,188 <b>Aa</b>	0,110
8	20	0,064 <b>Aa</b>	0,240 <b>Aa</b>	0,152
	40	0,166 <b>Aa</b>	0,342 <b>Aa</b>	0,254
9	20	0,040 <b>Aa</b>	0,317 <b>Aa</b>	0,178
	40	0,097 <b>Aa</b>	0,275 <b>Aa</b>	0,186
10	20	0,111 <b>Aa</b>	0,096 <b>Aa</b>	0,104
	40	0,129 <b>Aa</b>	0,151 <b>Aa</b>	0,140
14	20	0,198 <b>Aa</b>	0,685 <b>Ab</b>	0,442
	40	0,352 <b>Ba</b>	1,567 <b>Aa</b>	0,960
19	20	0,143 <b>Aa</b>	0,936 <b>Aa</b>	0,539
	40	0,529 <b>Aa</b>	1,082 <b>Aa</b>	0,805
20	20	0,335 <b>Aa</b>	1,144 <b>Ab</b>	0,740
	40	0,814 <b>Ba</b>	2,091 <b>Aa</b>	1,453
22	20	0,404 <b>Ba</b>	1,409 <b>Aa</b>	0,907
	40	1,037 <b>Ba</b>	2,908 <b>Ab</b>	1,973
28	20	0,201 <b>Aa</b>	0,994 <b>Aa</b>	0,598
	40	0,456 <b>Ba</b>	1,690 <b>Aa</b>	1,073
43	20	0,988 <b>Aa</b>	1,015 <b>Ab</b>	1,001
	40	1,513 <b>Ba</b>	2,970 <b>Aa</b>	2,241
48	20	0,656 <b>Ba</b>	2,055 <b>Ab</b>	1,355
	40	1,286 <b>Ba</b>	3,733 <b>Aa</b>	2,509
64	20	0,792 <b>Ba</b>	2,268 <b>Ab</b>	1,530
	40	1,236 <b>Ba</b>	4,642 <b>Aa</b>	2,939
65	20	1,572 <b>Bb</b>	3,669 <b>Ab</b>	2,621
	40	2,510 <b>Ba</b>	7,483 <b>Aa</b>	4,996
79	20	1,096 <b>Aa</b>	1,650 <b>Aa</b>	1,373
	40	1,362 <b>Ba</b>	2,412 <b>Aa</b>	1,887

Em cada precipitação e cada comprimento (linha), A difere de B pelo teste F ( $P < 0,05$ ).

Em cada precipitação e cada declividade (coluna), a difere de b pelo teste F ( $P < 0,05$ ).

No Quadro 4, pode-se observar que o peso de solo erosionado na precipitação de 7 mm, no segmento de estrada com declividade de 1% e comprimento de 40 m, foi 113,33% superior ao do comprimento de 20 m, com 0,032 e 0,015 kg, respectivamente. Na declividade de 7%, a perda de solo no segmento de estrada de 40 m foi 25,33% superior à do segmento de 20 m, apresentando 0,188 e 0,150 kg, respectivamente. No comprimento do segmento de 20 m, o peso de solo erosionado na declividade de 7% foi 900,00% superior ao da declividade de 1%, apresentando 0,150 e 0,015 kg, respectivamente. No comprimento do segmento de 40 m, a perda de solo na declividade

de 7% foi 487,50% superior àquela da declividade de 1%, apresentando 0,188 e 0,032 kg, respectivamente. As diferenças citadas não foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. Esses dados estão plotados na Figura 13.

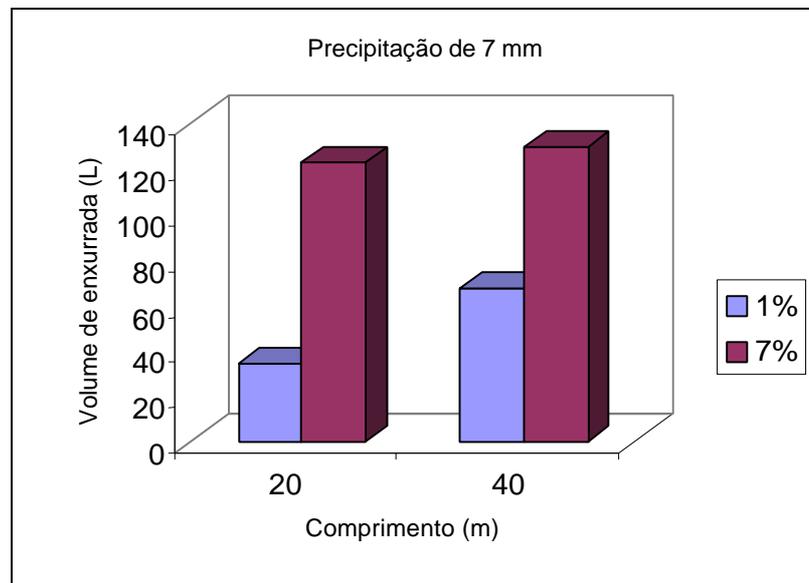


Figura 12 – Volume de enxurrada nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 7 mm.

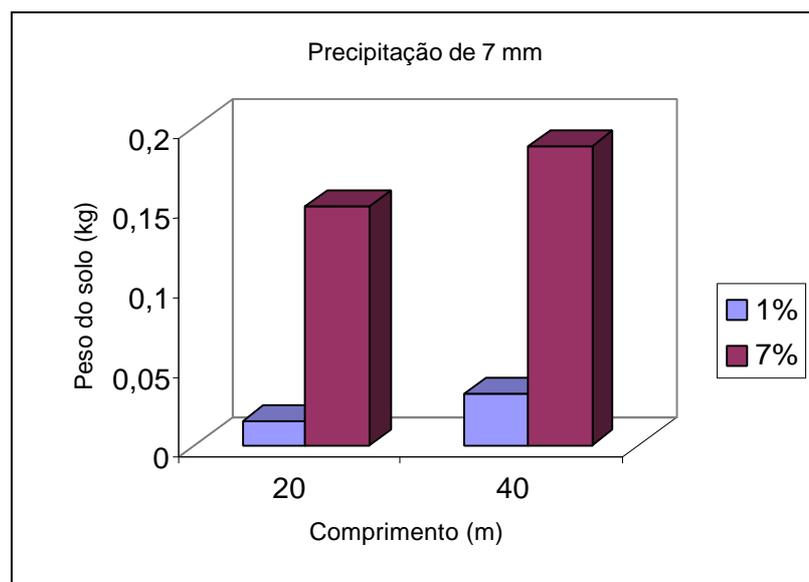


Figura 13 – Peso de solo erodido nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 7 mm.

Na precipitação de 8 mm, o volume de enxurrada na declividade de 1% e comprimento do segmento de 40 m foi 144,10% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 253,84 e 103,99 litros, respectivamente. Na declividade de 7%, o volume de enxurrada no segmento de estrada de 40 m foi 41,94% superior ao do segmento de 20 m, com 218,50 e 153,94 litros, respectivamente. No comprimento do segmento de 20 m, o volume de enxurrada na declividade de 7% foi 48,03% superior ao da declividade de 1%, apresentando 153,94 e 103,99 litros, respectivamente.

No comprimento do segmento de 40 m, o volume de enxurrada na declividade de 1% foi 16,17% superior ao da declividade de 7%, com 253,84 e 218,50 litros, respectivamente (Quadro 3). Esses resultados podem ser explicados pela variação na intensidade e distribuição da precipitação, influenciados também pela disposição das unidades experimentais nas extremidades opostas do trecho experimental.

As diferenças apresentadas não foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. Esses dados estão plotados na Figura 14.

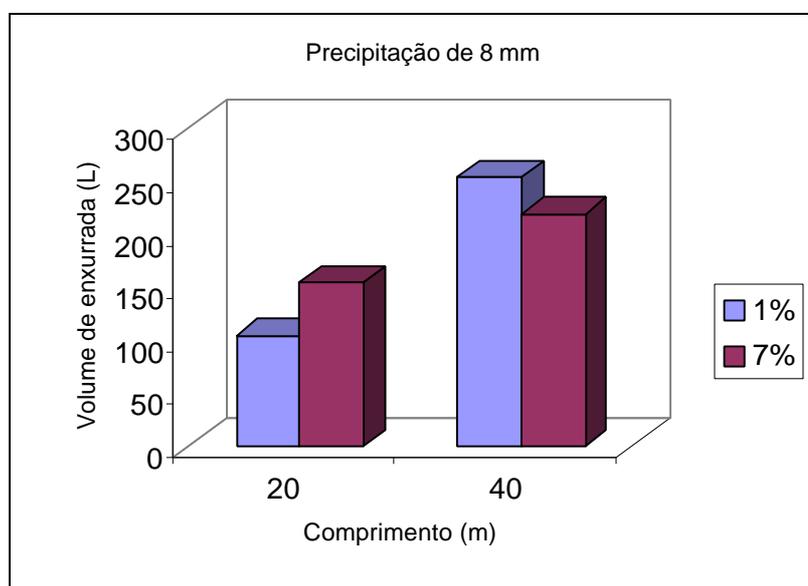


Figura 14 – Volume de enxurrada nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 8 mm.

Conforme os dados do Quadro 4, o peso de solo erodido na precipitação de 8 mm, no segmento de estrada com declividade de 1% e comprimento

de 40 m, foi 159,38% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 0,166 e 0,064 kg, respectivamente. Na declividade de 7%, a perda de solo no segmento de estrada de 40 m foi 42,50% superior à do segmento de 20 m, apresentando 0,342 e 0,240 kg, respectivamente. No comprimento do segmento de 20 m, o peso de solo erosionado na declividade de 7% foi 275,00% superior ao da declividade de 1%, com 0,240 e 0,064 kg, respectivamente. No comprimento do segmento de 40 m, a perda de solo na declividade de 7% foi 106,02% superior à da declividade de 1%, apresentando 0,342 e 0,166 kg, respectivamente. As diferenças apresentadas não foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. Os dados estão plotados na Figura 15.

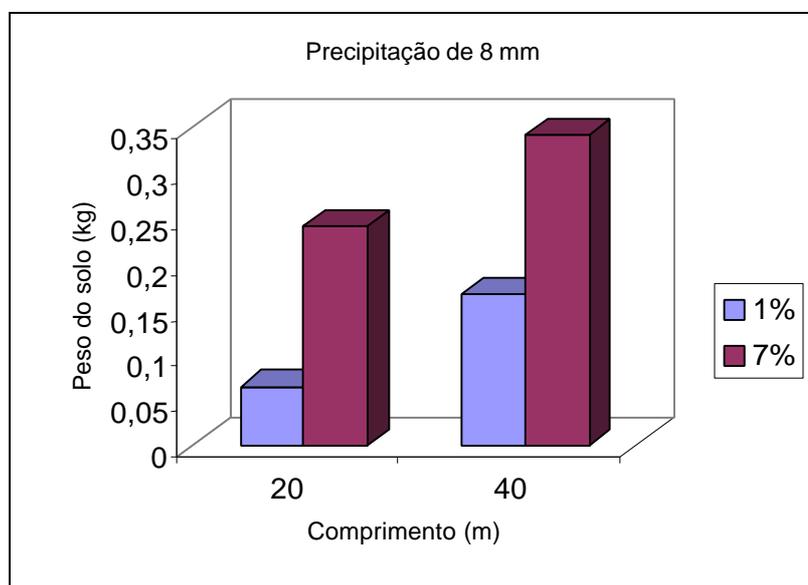


Figura 15 – Peso de solo erosionado nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 8 mm.

No Quadro 3, pode-se observar que, na precipitação de 9 mm, o volume de enxurrada na declividade de 1% e no comprimento do segmento de 40 m foi 147,42% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 69,92 e 28,26 litros, respectivamente. No comprimento do segmento de 20 m, o volume de enxurrada na declividade de 7% foi 297,52% superior ao da declividade de 1%, com 112,34 e 28,26 litros, respectivamente. No comprimento do segmento de 40 m, o volume de enxurrada na declividade de 7% foi 60,60% superior ao da declividade de 1%, apresentando 112,29 e 69,92 litros, respectivamente.

Na declividade de 7%, o volume de enxurrada no segmento de estrada de 20 m foi 0,04% superior ao do segmento de 40 m, com 112,34 e 112,29 litros, respectivamente. Esses dados podem ser explicados pela disposição dos segmentos em extremidades opostas do trecho experimental, influenciados pela distribuição irregular das precipitações. Em consequência, pode-se observar que a perda de solo também é maior no segmento de estrada de 20 m na declividade de 7%, quando comparado com o segmento de 40 m de comprimento (Quadro 4). As diferenças citadas não foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. Esses dados estão plotados na Figura 16.

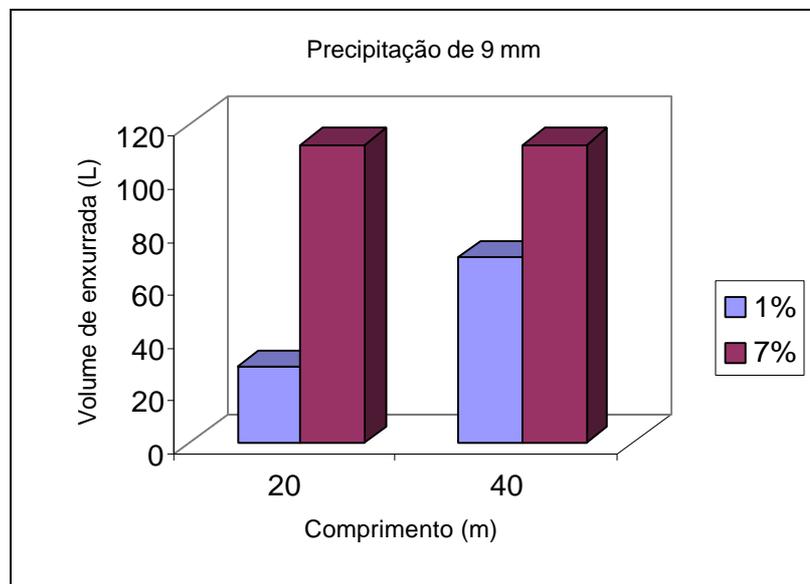


Figura 16 – Volume de enxurrada nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 9 mm.

O peso de solo erosionado na precipitação de 9 mm, no segmento de estrada com declividade de 1% e comprimento de 40 m, foi 142,50% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 0,097 e 0,040 kg, respectivamente. Na declividade de 7%, a perda de solo no segmento de estrada de 20 m foi 15,27% superior à do segmento de 40 m, apresentando 0,317 e 0,275 kg, respectivamente. No comprimento do segmento de 20 m, o peso de solo erosionado na declividade de 7% foi 692,50% superior ao da declividade de 1%, com 0,317 e 0,040 kg, respectivamente. No comprimento do segmento de

40 m, a perda de solo na declividade de 7% foi 183,51% superior à da declividade de 1%, com 0,275 e 0,097 kg, respectivamente (Quadro 4). As diferenças não foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. Esses dados estão plotados na Figura 17.

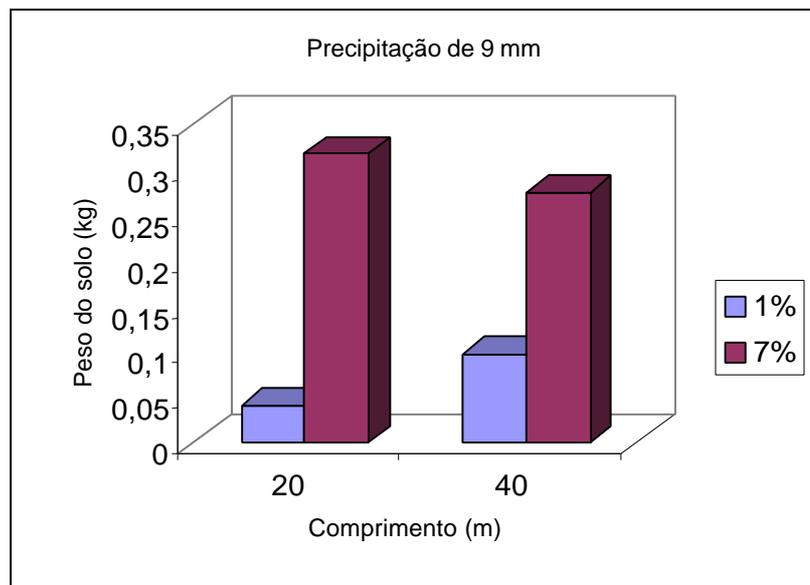


Figura 17 – Peso de solo erosionado nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 9 mm.

Em experimentos realizados por ELLIOT et al. (1997), foi constatado que o incremento na erosão do solo é diretamente proporcional ao aumento da declividade e do comprimento da estrada. Esse comportamento pôde ser observado na precipitação de 10 mm, onde o volume de enxurrada na declividade de 7% e no comprimento do segmento de 40 m foi 27,28% superior ao do segmento de 20 m, apresentando 153,87 e 120,89 litros, respectivamente.

Entretanto, a distribuição irregular das precipitações, juntamente com diferenças na intensidade de um mesmo evento de chuva natural ao longo do trecho experimental, pode proporcionar resultados diferentes dos anteriormente citados. Na declividade de 1%, o volume de enxurrada no segmento de estrada de 20 m foi 0,60% superior ao do segmento de 40 m, apresentando 161,02 e 160,06 litros, respectivamente. No comprimento do segmento de 20 m, o volume de enxurrada na declividade de 1% foi 33,20% superior ao da declividade

de 7%, com 161,02 e 120,89 litros, respectivamente. No comprimento do segmento de 40 m, o volume de enxurrada na declividade de 1% foi 4,02% superior ao da declividade de 7%, apresentando 160,06 e 153,87 litros, respectivamente. As diferenças não foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. Os dados estão plotados na Figura 18.

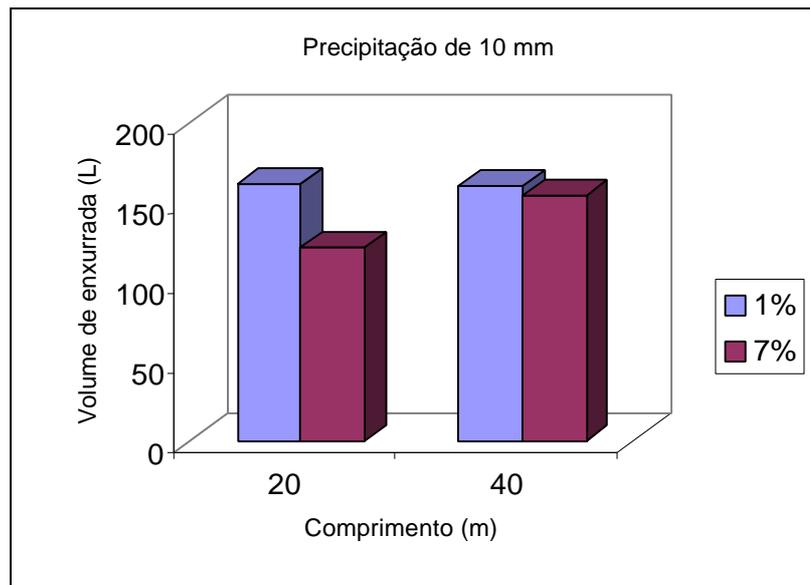


Figura 18 – Volume de enxurrada nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 10 mm.

No Quadro 4, pode-se observar que o peso de solo erosionado na precipitação de 10 mm, no segmento de estrada com declividade de 1% e comprimento de 40 m, foi 16,22% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 0,129 e 0,111 kg, respectivamente. Na declividade de 7%, a perda de solo no segmento de estrada de 40 m foi 57,29% superior à do segmento de 20 m, apresentando 0,151 e 0,096 kg, respectivamente. No comprimento do segmento de 40 m, a perda de solo na declividade de 7% foi 17,05% superior à da declividade de 1%, com 0,151 e 0,129 kg, respectivamente.

No comprimento do segmento de 20 m, o peso de solo erosionado na declividade de 1% foi 15,63% superior ao da declividade de 7%, apresentando 0,111 e 0,096 kg, respectivamente. Com a distribuição irregular e as diferenças na intensidade da precipitação, o segmento de 20 m de comprimento e 1% de

declividade recebeu volume de chuva maior que o segmento de 20 m na declividade de 7%, ocasionando perda de solo mais significativa na menor declividade. As diferenças não foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. Os dados estão plotados na Figura 19.

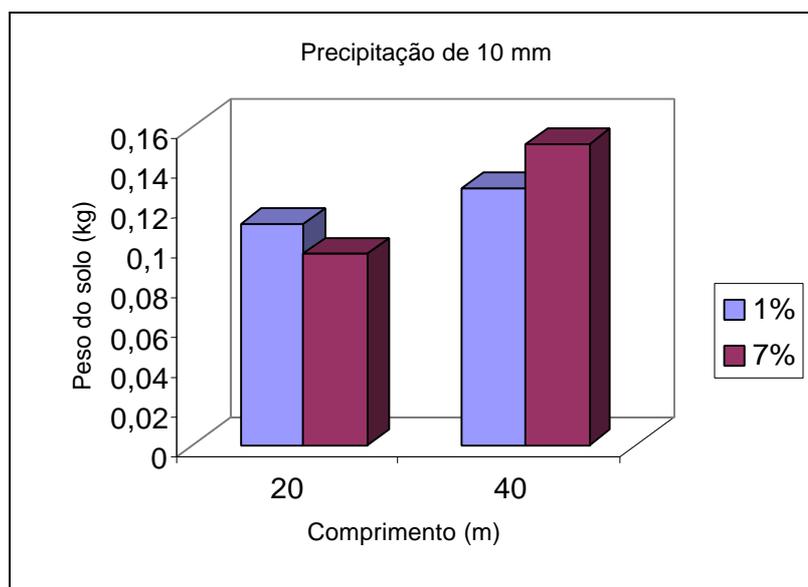


Figura 19 – Peso de solo erodido nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 10 mm.

Na precipitação de 14 mm, o volume de enxurrada na declividade de 1% e no comprimento do segmento de 40 m foi 87,35% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 582,06 e 310,68 litros, respectivamente. Na declividade de 7%, o volume de enxurrada no segmento de estrada de 40 m foi 62,76% superior ao do segmento de 20 m, apresentando 432,46 e 265,70 litros, respectivamente.

No comprimento do segmento de 20 m, o volume de enxurrada na declividade de 1% foi 16,93% superior ao da declividade de 7%, com 310,68 e 265,70 litros, respectivamente. No comprimento do segmento de 40 m, o volume de enxurrada na declividade de 1% foi 34,59% superior ao da declividade de 7%, apresentando 582,06 e 432,46 litros, respectivamente (Quadro 3). Esses resultados ocorreram devido à distribuição irregular das precipitações,

proporcionando volume maior de chuva nas menores declividades. As diferenças citadas não foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. Esses dados estão plotados na Figura 20.

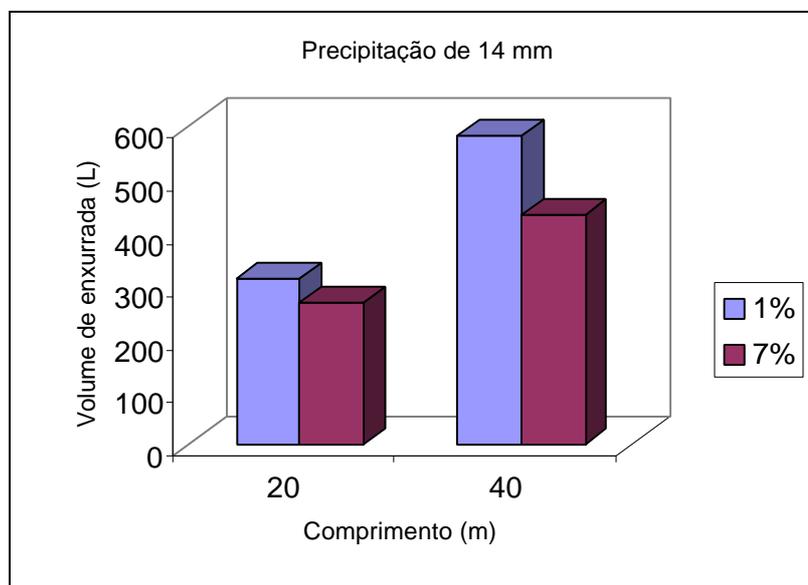


Figura 20 – Volume de enxurrada nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 14 mm.

Conforme os dados do Quadro 4, o peso de solo erodido na precipitação de 14 mm, no segmento de estrada com declividade de 1% e comprimento de 40 m, foi 77,78% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 0,352 e 0,198 kg, respectivamente. A diferença não foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. Na declividade de 7%, a perda de solo no segmento de estrada de 40 m foi 128,76% superior à do segmento de 20 m, com 1,567 e 0,685 kg, respectivamente. A diferença foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. No comprimento do segmento de 20 m, o peso de solo erodido na declividade de 7% foi 245,96% superior ao da declividade de 1%, apresentando 0,685 e 0,198 kg, respectivamente. A diferença não foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. No comprimento do segmento de 40 m, a perda de solo na declividade de 7% foi 345,17% superior à da declividade de 1%, com 1,567 e 0,352 kg, respectivamente. A diferença foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. Esses dados estão plotados na Figura 21.

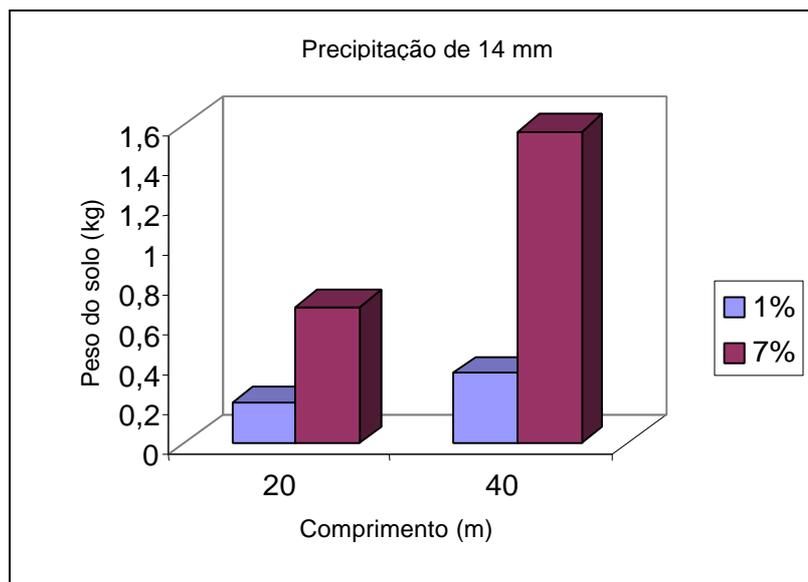


Figura 21 – Peso de solo erodido nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 14 mm.

No Quadro 3, pode-se observar que, na precipitação de 19 mm, o volume de enxurrada na declividade de 1% e no comprimento do segmento de 40 m foi 174,04% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 445,09 e 162,42 litros, respectivamente. Na declividade de 7%, o volume de enxurrada no segmento de estrada de 40 m foi 35,31% superior ao do segmento de 20 m, com 435,40 e 321,78 litros, respectivamente. No comprimento do segmento de 20 m, o volume de enxurrada na declividade de 7% foi 98,12% superior ao da declividade de 1%, apresentando 321,78 e 162,42 litros, respectivamente.

No comprimento do segmento de 40 m, o volume de enxurrada na declividade de 1% foi 2,23% superior ao da declividade de 7%, apresentando 445,09 e 435,40 litros, respectivamente. Esses resultados podem ser explicados pela disposição dos segmentos em extremidades opostas do trecho experimental, sendo influenciados pela distribuição irregular das precipitações. As diferenças apresentadas não foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. Esses dados estão plotados na Figura 22.

O peso de solo erodido na precipitação de 19 mm, no segmento de estrada com declividade de 1% e comprimento de 40 m, foi 269,93% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 0,529 e 0,143 kg, respectivamente. Na declividade de 7%, a perda de solo no segmento de estrada de 40 m foi

15,60% superior à do segmento de 20 m, com 1,082 e 0,936 kg, respectivamente. No comprimento do segmento de 20 m, o peso de solo erodido na declividade de 7% foi 554,55% superior ao da declividade de 1%, apresentando 0,936 e 0,143 kg, respectivamente. No comprimento do segmento de 40 m, a perda de solo na declividade de 7% foi 104,54% superior à da declividade de 1%, com 1,082 e 0,529 kg, respectivamente (Quadro 4). As diferenças apresentadas não foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. Os dados estão plotados na Figura 23.

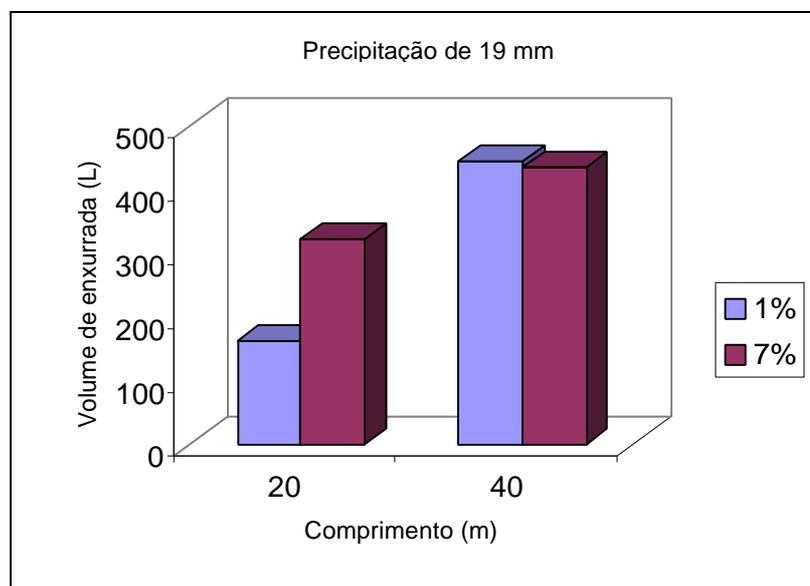


Figura 22 – Volume de enxurrada nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 19 mm.

Conforme os dados do Quadro 3, na precipitação de 20 mm, o volume de enxurrada na declividade de 1% e no comprimento do segmento de 40 m foi 73,23% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 1.106,76 e 638,90 litros, respectivamente. Na declividade de 7%, o volume de enxurrada no segmento de estrada de 40 m foi 58,53% superior ao do segmento de 20 m, apresentando 1.258,59 e 793,92 litros, respectivamente. As diferenças citadas foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. No comprimento do segmento de 20 m, o volume de enxurrada na declividade de 7% foi 24,26% superior ao da declividade de 1%, com 793,92 e 638,90 litros, respectivamente. No comprimento do segmento de 40 m, o volume de enxurrada na declividade

de 7% foi 13,72% superior ao da declividade de 1%, apresentando 1.258,59 e 1.106,76 litros, respectivamente. As diferenças citadas não foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. Os dados estão plotados na Figura 24.

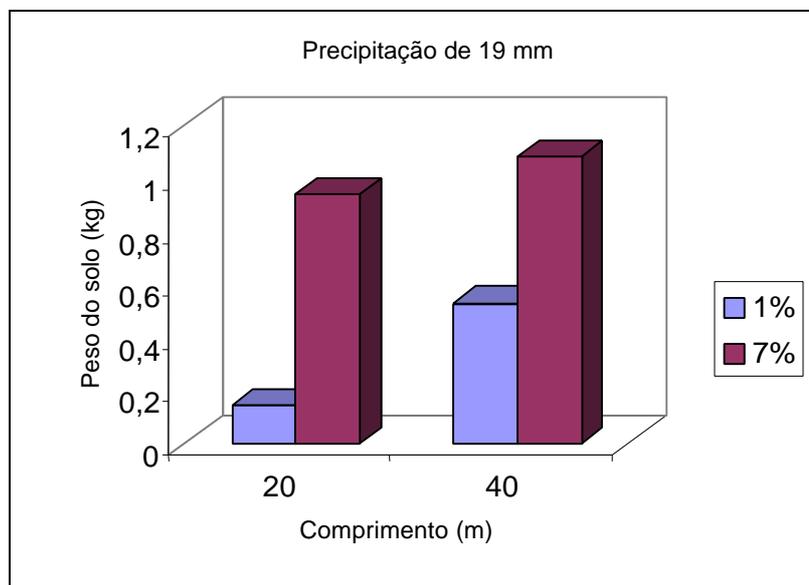


Figura 23 – Peso de solo erosionado nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 19 mm.

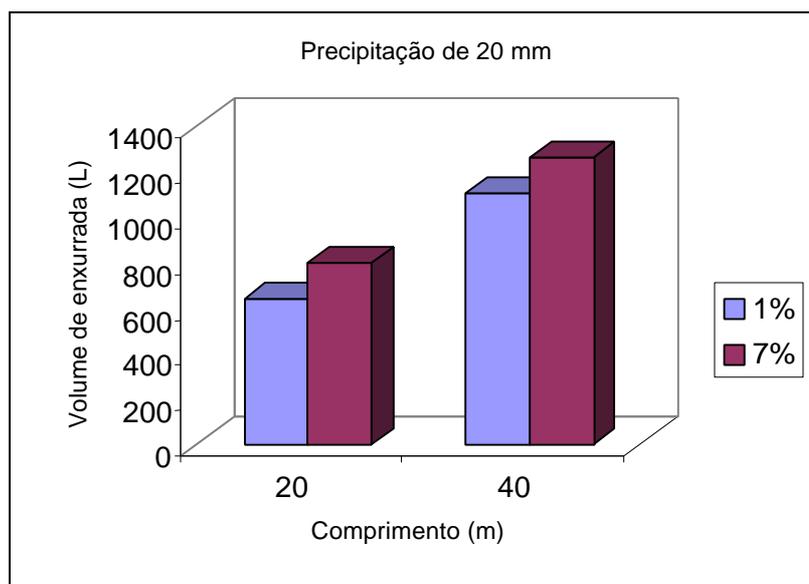


Figura 24 – Volume de enxurrada nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 20 mm.

No Quadro 4, pode-se observar que o peso de solo erosionado na precipitação de 20 mm, no segmento de estrada com declividade de 1% e comprimento de 40 m, foi 142,99% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 0,814 e 0,335 kg, respectivamente. A diferença não foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. Na declividade de 7%, a perda de solo no segmento de estrada de 40 m foi 82,78% superior à do segmento de 20 m, apresentando 2,091 e 1,144 kg, respectivamente. A diferença foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. No comprimento do segmento de 20 m, o peso de solo erosionado na declividade de 7% foi 241,49% superior ao da declividade de 1%, apresentando 1,144 e 0,335 kg, respectivamente. A diferença não foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. No comprimento do segmento de 40 m, a perda de solo na declividade de 7% foi 156,88% superior à da declividade de 1%, com 2,091 e 0,814 kg, respectivamente. A diferença foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. Esses dados estão plotados na Figura 25.

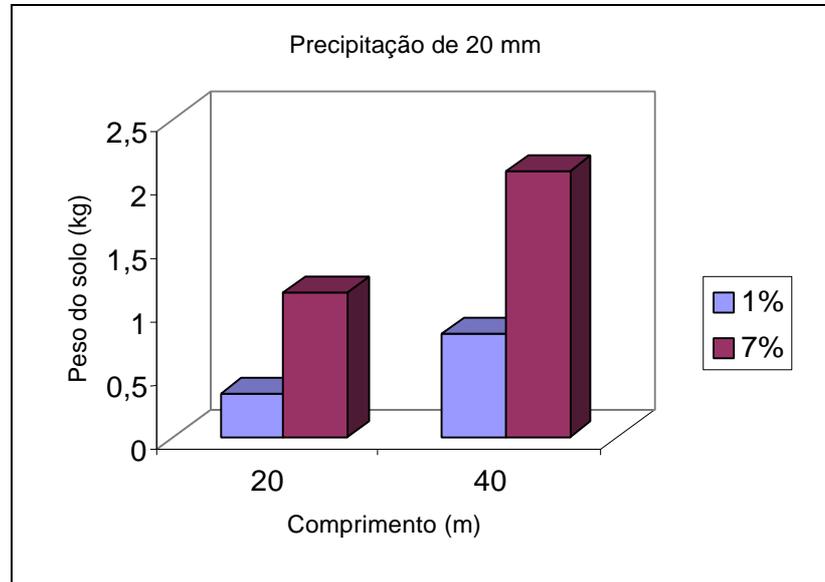


Figura 25 – Peso de solo erosionado nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 20 mm.

Na precipitação de 22 mm, o volume de enxurrada na declividade de 1% e no comprimento do segmento de 40 m foi 151,34% superior ao do

comprimento de 20 m, apresentando 1.054,07 e 419,38 litros, respectivamente. Na declividade de 7%, o volume de enxurrada no segmento de estrada de 40 m foi 45,80% superior ao do segmento de 20 m, com 1.205,90 e 827,09 litros, respectivamente. No comprimento do segmento de 20 m, o volume de enxurrada na declividade de 7% foi 97,22% superior ao da declividade de 1%, apresentando 827,09 e 419,38 litros, respectivamente. As diferenças apresentadas foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. No comprimento do segmento de 40 m, o volume de enxurrada na declividade de 7% foi 14,40% superior ao da declividade de 1%, com 1.205,90 e 1.054,07 litros, respectivamente (Quadro 3). A diferença não foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. Os dados estão plotados na Figura 26.

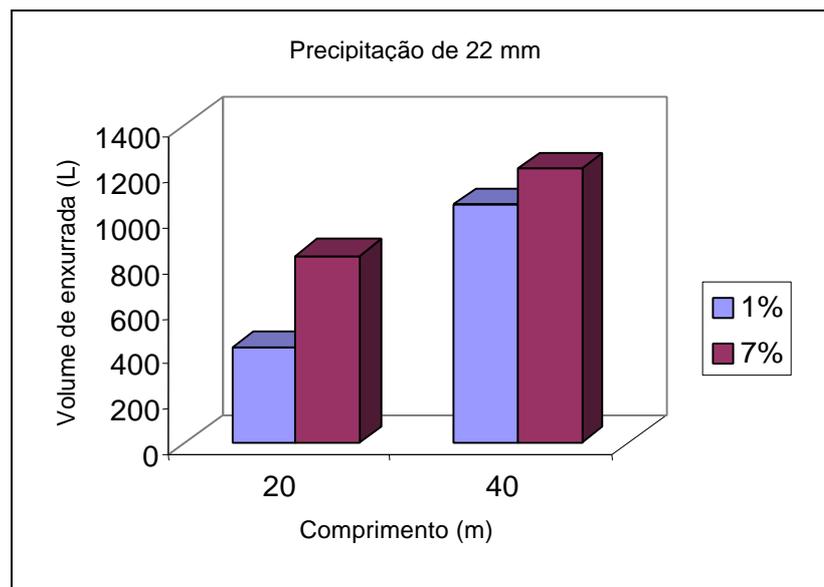


Figura 26 – Volume de enxurrada nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 22 mm.

Conforme os dados do Quadro 4, o peso de solo erosionado na precipitação de 22 mm, no segmento de estrada com declividade de 1% e comprimento de 40 m, foi 156,68% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 1,037 e 0,404 kg, respectivamente. A diferença não foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. Na declividade de 7%, a perda de

solo no segmento de estrada de 40 m foi 106,39% superior à do segmento de 20 m, com 2,908 e 1,409 kg, respectivamente. No comprimento do segmento de 20 m, o peso de solo erosionado na declividade de 7% foi 248,76% superior ao da declividade de 1%, apresentando 1,409 e 0,404 kg, respectivamente. No comprimento do segmento de 40 m, a perda de solo na declividade de 7% foi 180,42% superior à da declividade de 1%, com 2,908 e 1,037 kg, respectivamente. As diferenças citadas foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. Os dados estão plotados na Figura 27.

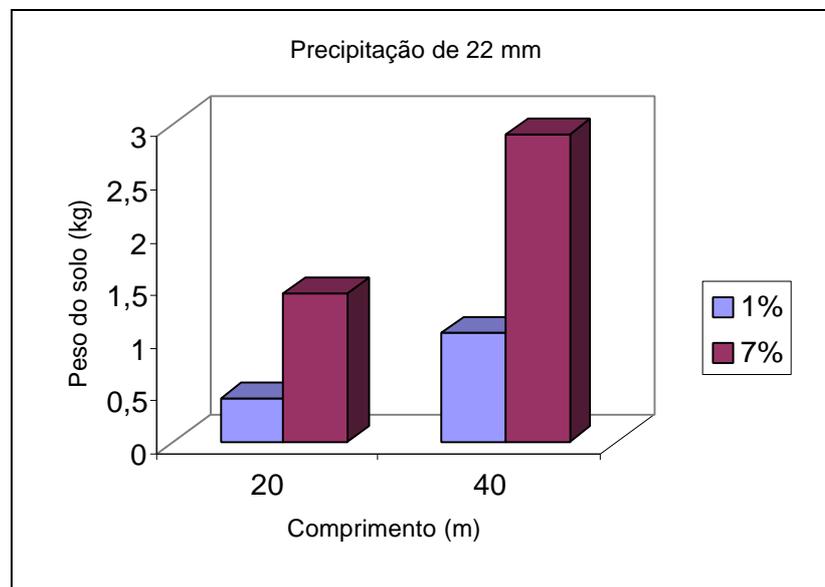


Figura 27 – Peso de solo erosionado nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 22 mm.

No Quadro 3, pode-se observar que, na precipitação de 28 mm, o volume de enxurrada na declividade de 1% e no comprimento do segmento de 40 m foi 142,74% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 716,03 e 294,98 litros, respectivamente. A diferença foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. Na declividade de 7%, o volume de enxurrada no segmento de estrada de 40 m foi 17,50% superior ao do segmento de 20 m, com 847,76 e 721,51 litros, respectivamente. A diferença não foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. No comprimento do segmento de 20 m, o volume de

enxurrada na declividade de 7% foi 144,60% superior ao da declividade de 1%, apresentando 721,51 e 294,98 litros, respectivamente. A diferença foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. No comprimento do segmento de 40 m, o volume de enxurrada na declividade de 7% foi 18,40% superior ao da declividade de 1%, com 847,76 e 716,03 litros, respectivamente. A diferença não foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. Esses dados estão plotados na Figura 28.

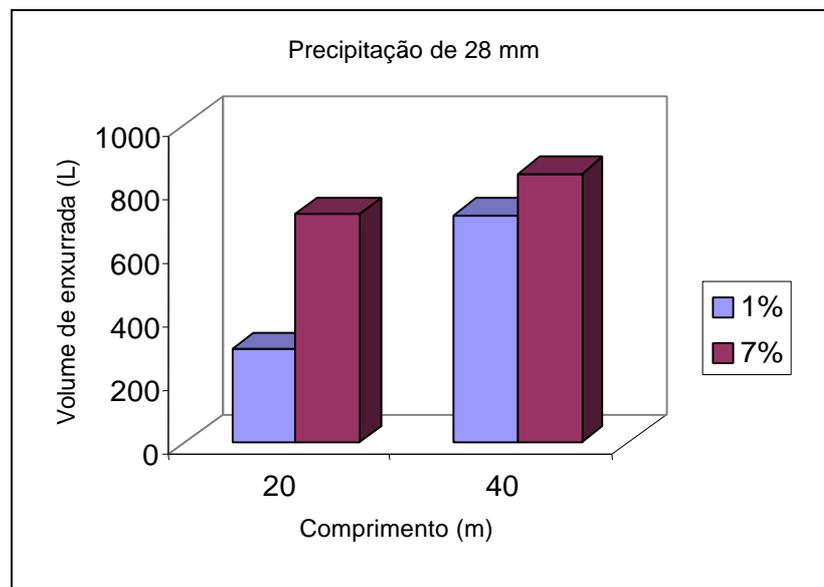


Figura 28 – Volume de enxurrada nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 28 mm.

O peso de solo erosionado na precipitação de 28 mm, no segmento de estrada com declividade de 1% e comprimento de 40 m, foi 126,87% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 0,456 e 0,201 kg, respectivamente. Na declividade de 7%, a perda de solo no segmento de estrada de 40 m foi 70,02% superior à do segmento de 20 m, com 1,690 e 0,994 kg, respectivamente. No comprimento do segmento de 20 m, o peso de solo erosionado na declividade de 7% foi 394,53% superior ao da declividade de 1%, apresentando 0,994 e 0,201 kg, respectivamente. As diferenças apresentadas não foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. No comprimento do segmento de 40 m, a perda de solo na declividade de 7% foi 270,61% superior à da

declividade de 1%, com 1,690 e 0,456 kg, respectivamente (Quadro 4). A diferença foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. Esses dados estão plotados na Figura 29.

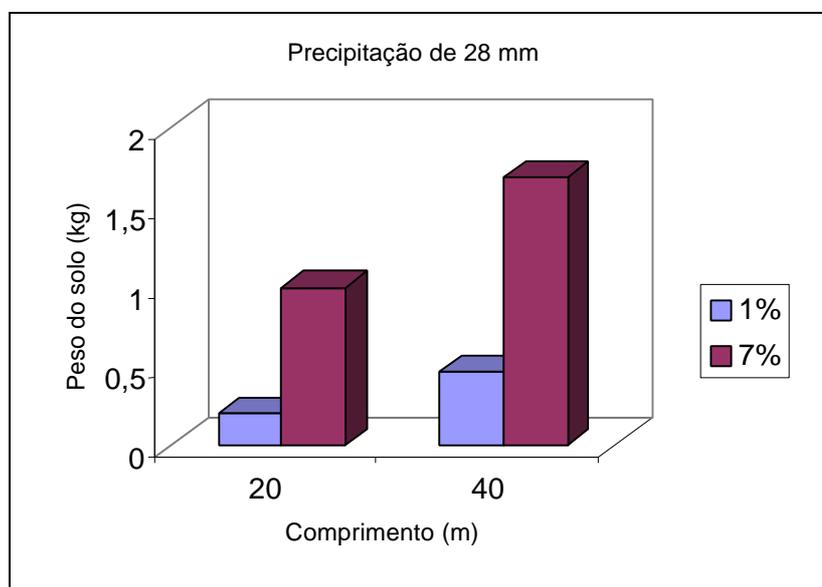


Figura 29 – Peso de solo erodido nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 28 mm.

Conforme os dados do Quadro 3, na precipitação de 43 mm, o volume de enxurrada na declividade de 1% e no comprimento do segmento de 40 m foi 67,68% superior ao comprimento de 20 m, apresentando 1.594,19 e 950,72 litros, respectivamente. Na declividade de 7%, o volume de enxurrada no segmento de estrada de 40 m foi 54,68% superior ao do segmento de 20 m, com 1.460,88 e 944,47 litros, respectivamente. As diferenças foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade.

No comprimento do segmento de 20 m, o volume de enxurrada na declividade de 1% foi 0,66% superior ao da declividade de 7%, apresentando 950,72 e 944,47 litros, respectivamente. No comprimento do segmento de 40 m, o volume de enxurrada na declividade de 1% foi 9,13% superior ao da declividade de 7%, com 1.594,19 e 1.460,88 litros, respectivamente. Esses resultados ocorreram devido à distribuição irregular das precipitações, proporcionando volume maior de chuva nas menores declividades. As diferenças não

foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. Esses dados estão plotados na Figura 30.

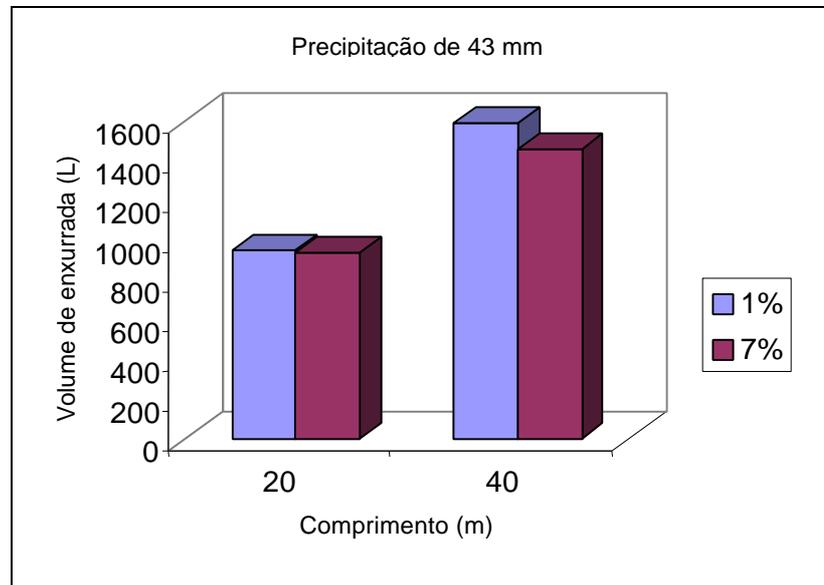


Figura 30 – Volume de enxurrada nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 43 mm.

No Quadro 4, pode-se observar que o peso de solo erosionado na precipitação de 43 mm, no segmento de estrada com declividade de 1% e comprimento de 40 m, foi 53,14% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 1,513 e 0,988 kg, respectivamente. A diferença não foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. Na declividade de 7%, a perda de solo no segmento de estrada de 40 m foi 192,61% superior à do segmento de 20 m, com 2,970 e 1,015 kg, respectivamente. A diferença foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. No comprimento do segmento de 20 m, o peso de solo erosionado na declividade de 7% foi 2,73% superior ao da declividade de 1%, apresentando 1,015 e 0,988 kg, respectivamente. A diferença não foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. No comprimento do segmento de 40 m, a perda de solo na declividade de 7% foi 96,30% superior à da declividade de 1%, com 2,970 e 1,513 kg, respectivamente. A diferença foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. Os dados estão plotados na Figura 31.

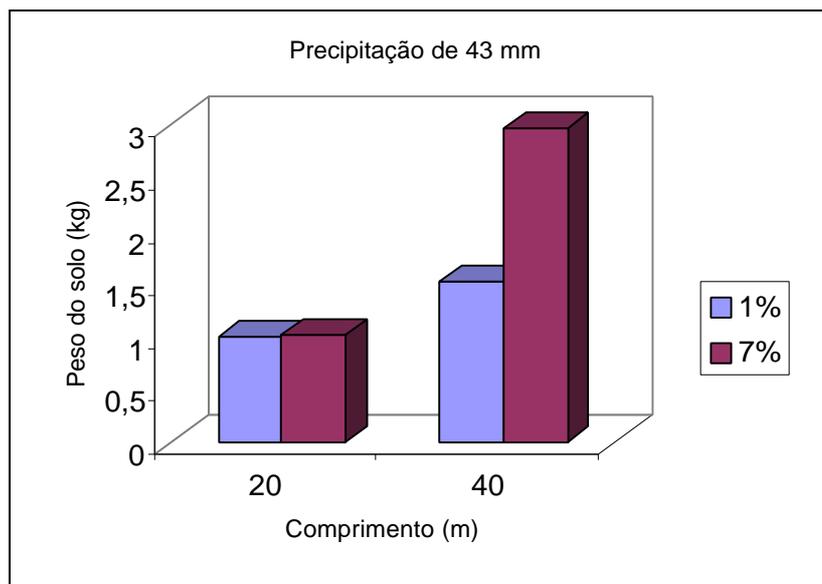


Figura 31 – Peso de solo erodido nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 43 mm.

Na precipitação de 48 mm, o volume de enxurrada na declividade de 1% e no comprimento do segmento de 40 m foi 27,59% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 1.522,06 e 1.192,95 litros, respectivamente. Na declividade de 7%, o volume de enxurrada no segmento de estrada de 40 m foi 47,70% superior ao do segmento de 20 m, com 1.639,95 e 1.110,34 litros, respectivamente. As diferenças foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade.

No comprimento do segmento de 20 m, o volume de enxurrada na declividade de 1% foi 7,44% superior ao da declividade de 7%, apresentando 1.192,95 e 1.110,34 litros, respectivamente. Esses resultados ocorreram devido à disposição dos segmentos em extremidades opostas do trecho experimental, sendo influenciados pela distribuição irregular das precipitações. No comprimento do segmento de 40 m, o volume de enxurrada na declividade de 7% foi 7,75% superior ao da declividade de 1%, com 1.639,95 e 1.522,06 litros, respectivamente (Quadro 3). As diferenças não foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. Os dados estão plotados na Figura 32.

Conforme os dados do Quadro 4, o peso de solo erodido na precipitação de 48 mm, no segmento de estrada com declividade de 1% e comprimento de 40 m, foi 96,04% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando

1,286 e 0,656 kg, respectivamente. A diferença não foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. Na declividade de 7%, a perda de solo no segmento de estrada de 40 m foi 81,65% superior à do segmento de 20 m, com 3,733 e 2,055 kg, respectivamente. No comprimento do segmento de 20 m, o peso de solo erodido na declividade de 7% foi 213,26% superior ao da declividade de 1%, apresentando 2,055 e 0,656 kg, respectivamente. No comprimento do segmento de 40 m, a perda de solo na declividade de 7% foi 190,28% superior à da declividade de 1%, apresentando 3,733 e 1,286 kg, respectivamente. As diferenças citadas foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. Esses dados estão plotados na Figura 33.

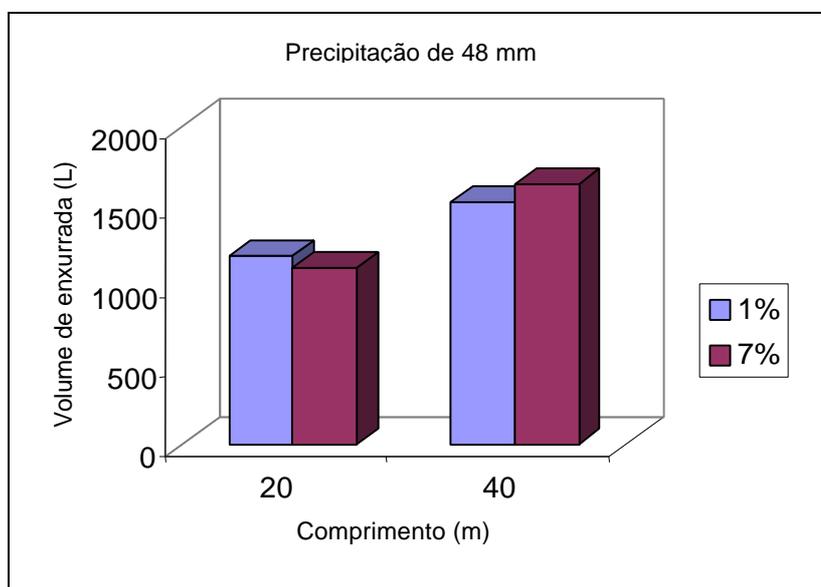


Figura 32 – Volume de enxurrada nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 48 mm.

No Quadro 3, pode-se observar que, na precipitação de 64 mm, o volume de enxurrada na declividade de 1% e no comprimento do segmento de 40 m foi 38,62% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 1.641,29 e 1.184,02 litros, respectivamente. Na declividade de 7%, o volume de enxurrada no segmento de estrada de 40 m foi 46,21% superior ao do segmento de 20 m, com 1.791,33 e 1.225,16 litros, respectivamente. As diferenças foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. No comprimento do segmento de 20 m, o volume de enxurrada na declividade de 7% foi 3,47% superior ao da

declividade de 1%, apresentando 1.225,16 e 1.184,02 litros, respectivamente. No comprimento do segmento de 40 m, o volume de enxurrada na declividade de 7% foi 9,14% superior ao da declividade de 1%, com 1.791,33 e 1.641,29 litros, respectivamente. As diferenças não foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. Esses dados estão plotados na Figura 34.

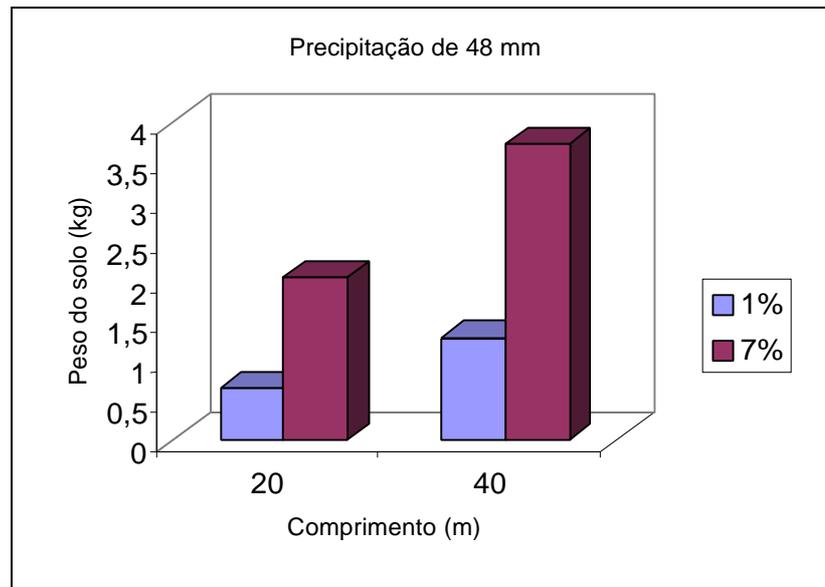


Figura 33 – Peso de solo erosionado nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 48 mm.

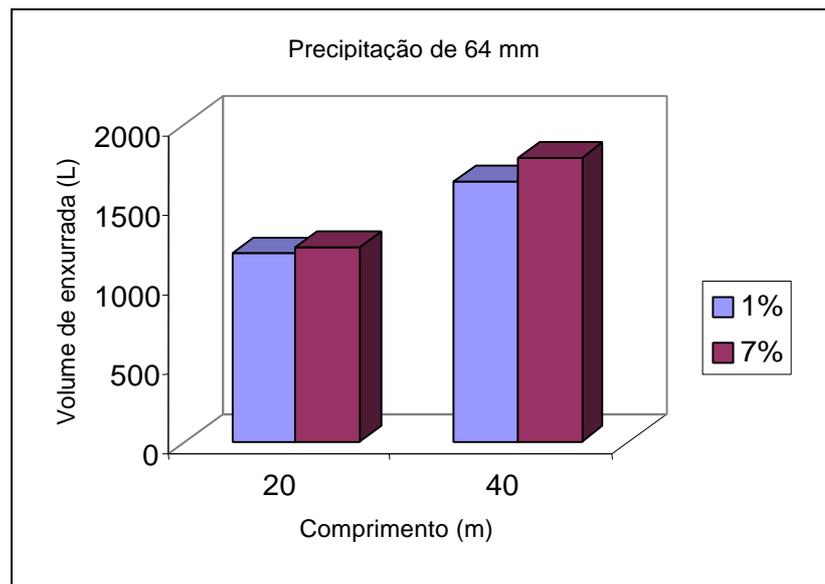


Figura 34 – Volume de enxurrada nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 64 mm.

O peso de solo erosionado na precipitação de 64 mm, no segmento de estrada com declividade de 1% e comprimento de 40 m, foi 56,06% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 1,236 e 0,792 kg, respectivamente. A diferença não foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. Na declividade de 7%, a perda de solo no segmento de estrada de 40 m foi 104,67% superior à do segmento de 20 m, com 4,642 e 2,268 kg, respectivamente. No comprimento do segmento de 20 m, o peso de solo erosionado na declividade de 7% foi 186,36% superior ao da declividade de 1%, apresentando 2,268 e 0,792 kg, respectivamente. No comprimento do segmento de 40 m, a perda de solo na declividade de 7% foi 275,57% superior à da declividade de 1%, com 4,642 e 1,236 kg, respectivamente (Quadro 4). As diferenças apresentadas foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. Os dados estão plotados na Figura 35.

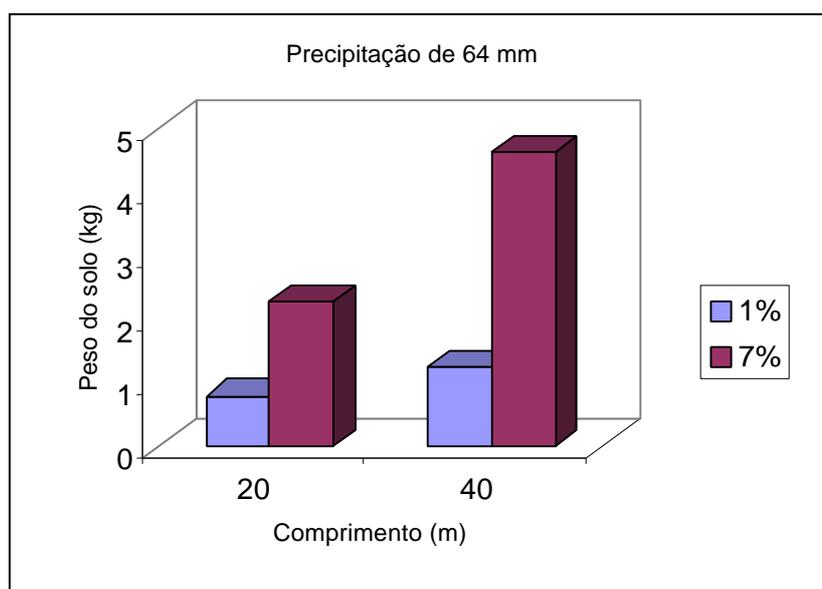


Figura 35 – Peso de solo erosionado nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 64 mm.

Conforme os dados do Quadro 3, na precipitação de 65 mm, o volume de enxurrada na declividade de 1% e no comprimento do segmento de 40 m foi 29,44% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 1.672,10 e 1.291,83 litros, respectivamente. Na declividade de 7%, o volume de enxurrada

no segmento de estrada de 40 m foi 43,62% superior ao do segmento de 20 m, com 1.971,64 e 1.372,85 litros, respectivamente. As diferenças foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. No comprimento do segmento de 20 m, o volume de enxurrada na declividade de 7% foi 6,27% superior ao da declividade de 1%, apresentando 1.372,85 e 1.291,83 litros, respectivamente. A diferença não foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. No comprimento do segmento de 40 m, o volume de enxurrada na declividade de 7% foi 17,91% superior ao da declividade de 1%, com 1.971,64 e 1.672,10 litros, respectivamente. A diferença foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. Os dados estão plotados na Figura 36.

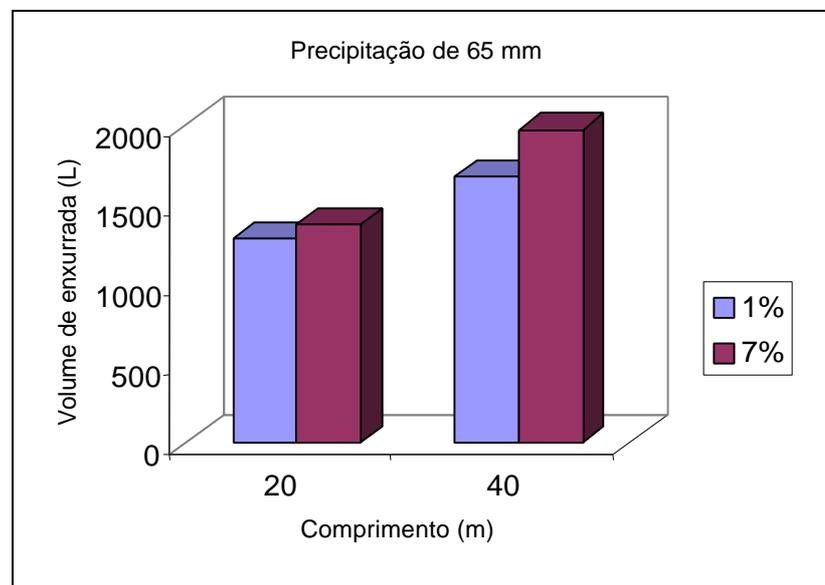


Figura 36 – Volume de enxurrada nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 65 mm.

No Quadro 4, pode-se observar que o peso de solo erodido na precipitação de 65 mm, no segmento de estrada com declividade de 1% e comprimento de 40 m, foi 59,67% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 2,510 e 1,572 kg, respectivamente. Na declividade de 7%, a perda de solo no segmento de estrada de 40 m foi 103,95% superior à do segmento de 20 m, com 7,483 e 3,669 kg, respectivamente. No comprimento do segmento de 20 m, o peso de solo erodido na declividade de 7% foi 133,40% superior ao da declividade de 1%, apresentando 3,669 e 1,572 kg, respectivamente. No

comprimento do segmento de 40 m, a perda de solo na declividade de 7% foi 198,13% superior à da declividade de 1%, com 7,483 e 2,510 kg, respectivamente. As diferenças foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. Esses dados estão plotados na Figura 37.

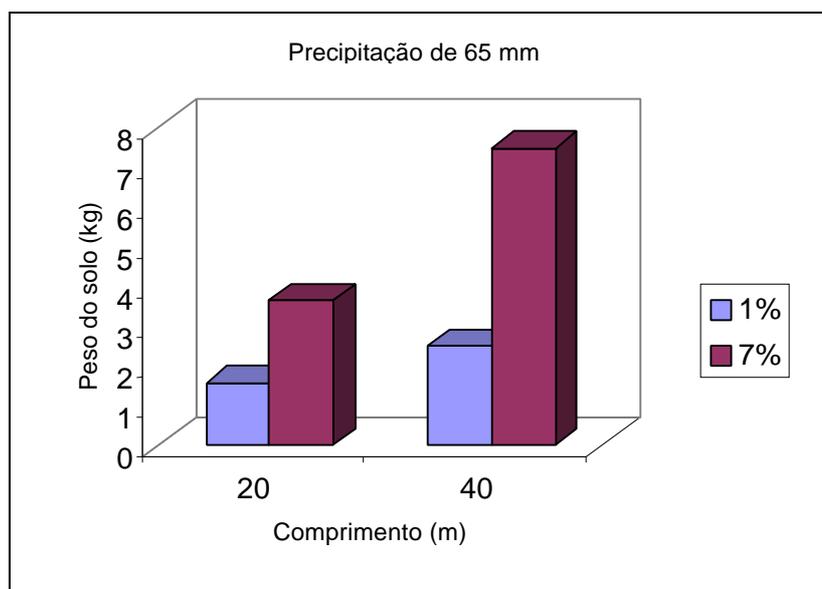


Figura 37 – Peso de solo erodido nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 65 mm.

Na precipitação de 79 mm, o volume de enxurrada na declividade de 1% e no comprimento do segmento de 40 m foi 22,56% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 1.568,06 e 1.279,39 litros, respectivamente. A diferença não foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. Na declividade de 7%, o volume de enxurrada no segmento de estrada de 40 m foi 77,14% superior ao do segmento de 20 m, com 1.809,20 e 1.021,34 litros, respectivamente. A diferença foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade.

No comprimento do segmento de 20 m, o volume de enxurrada na declividade de 1% foi 25,27% superior ao da declividade de 7%, apresentando 1.279,39 e 1.021,34 litros, respectivamente. Esses resultados são decorrentes da disposição dos segmentos em extremidades opostas do trecho experimental, sendo influenciados pela distribuição irregular das precipitações.

No comprimento do segmento de 40 m, o volume de enxurrada na declividade de 7% foi 15,38% superior ao da declividade de 1%, com 1.809,20 e 1.568,06 litros, respectivamente (Quadro 3). As diferenças não foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. Esses dados estão plotados na Figura 38.

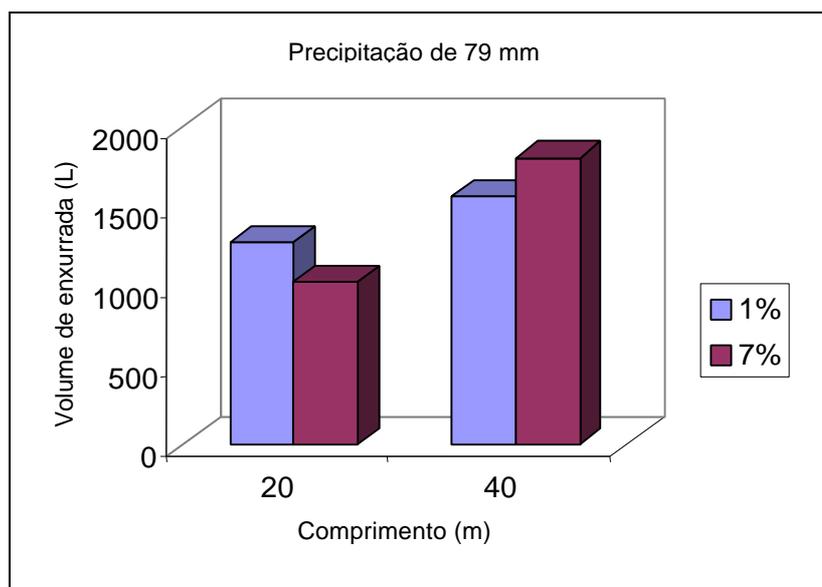


Figura 38 – Volume de enxurrada nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 79 mm.

Conforme os dados do Quadro 4, o peso de solo erosionado na precipitação de 79 mm, no segmento de estrada com declividade de 1% e comprimento de 40 m, foi 24,27% superior ao do comprimento de 20 m, apresentando 1,362 e 1,096 kg, respectivamente. Na declividade de 7%, a perda de solo no segmento de estrada de 40 m foi 46,18% superior à do segmento de 20 m, com 2,412 e 1,650 kg, respectivamente. No comprimento do segmento de 20 m, o peso de solo erosionado na declividade de 7% foi 50,55% superior ao da declividade de 1%, apresentando 1,650 e 1,096 kg, respectivamente. As diferenças apresentadas não foram significativas pelo teste F a 5% de probabilidade. No comprimento do segmento de 40 m, a perda de solo na declividade de 7% foi 77,09% superior à da declividade de 1%, com 2,412 e 1,362 kg, respectivamente. A diferença foi significativa pelo teste F a 5% de probabilidade. Os dados estão plotados na Figura 39.

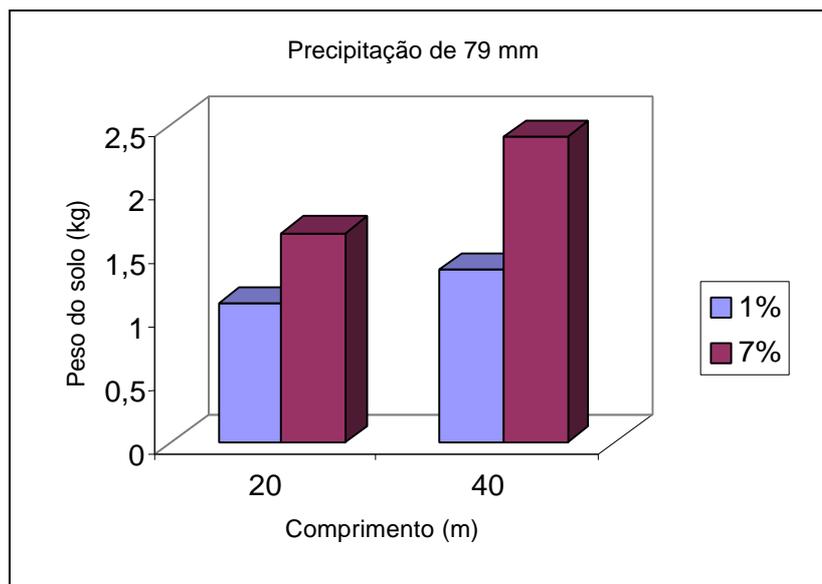


Figura 39 – Peso de solo erodido nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e declividade de 1 e 7%, na precipitação de 79 mm.

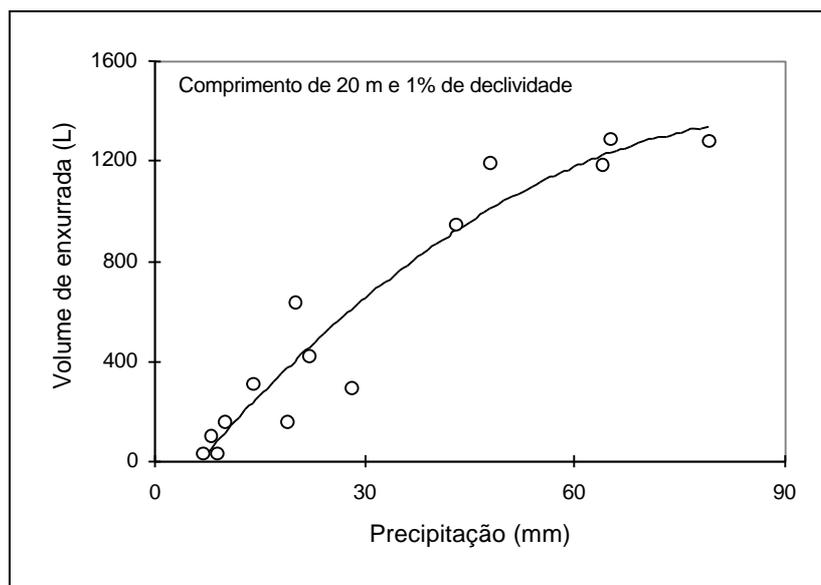
#### 4.3. Estimativas do volume de enxurrada e peso do solo em função da precipitação

Por meio dos coeficientes da equação de análise de regressão foi determinada a precipitação de 91,80 mm, que gerou o volume máximo de enxurrada no segmento de estrada com 20 m de comprimento e declividade de 1%. Na Figura 40, pode-se observar que, à medida que a precipitação aumenta, ocorre aumento quadrático do volume de enxurrada.

A precipitação de 79,00 mm gerou o peso máximo de solo erodido no segmento de estrada com 20 m de comprimento e declividade de 1%. Pode-se observar na Figura 41 que, com o aumento da precipitação, ocorre aumento linear do peso de solo erodido.

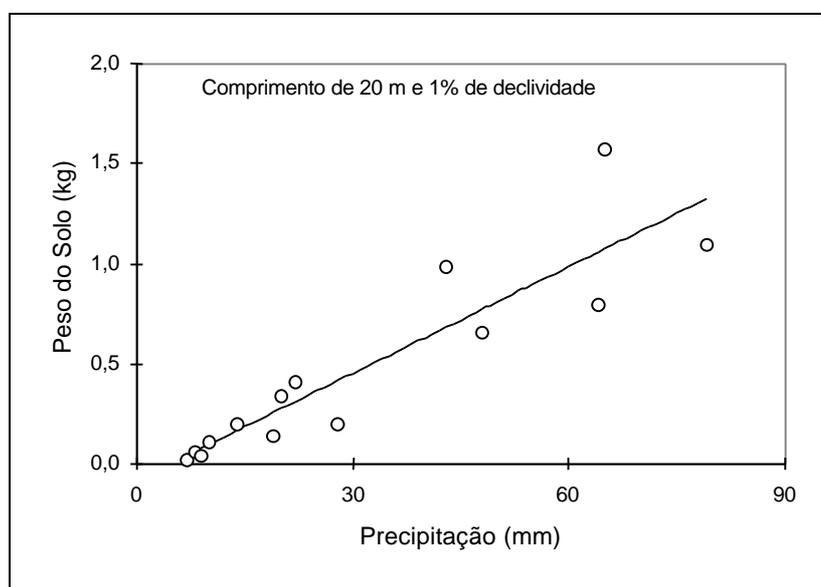
No segmento de estrada com 20 m de comprimento e 7% de declividade, o volume máximo de enxurrada foi observado na precipitação de 61,13 mm. Observa-se, na Figura 42, que ocorre aumento quadrático no volume de enxurrada à medida que aumenta o volume de precipitação.

O peso máximo de solo erodido foi encontrado no volume de 69,69 mm de precipitação, para o segmento de estrada com 20 m de comprimento e declividade de 7%. Conforme a Figura 43, o peso do solo aumenta em função do aumento da precipitação, seguindo uma tendência quadrática.



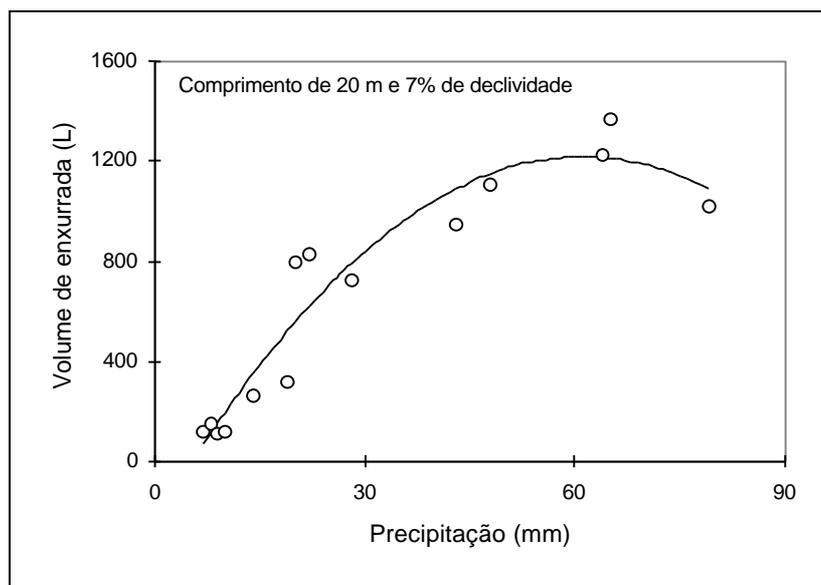
$$\hat{Y} = -212,0160 + 34,4054**P - 0,1874**P^2 \quad R^2 = 0,921$$

Figura 40 – Estimativa do volume de enxurrada no segmento de estrada com 20 m de comprimento e 1% de declividade, em função da precipitação.



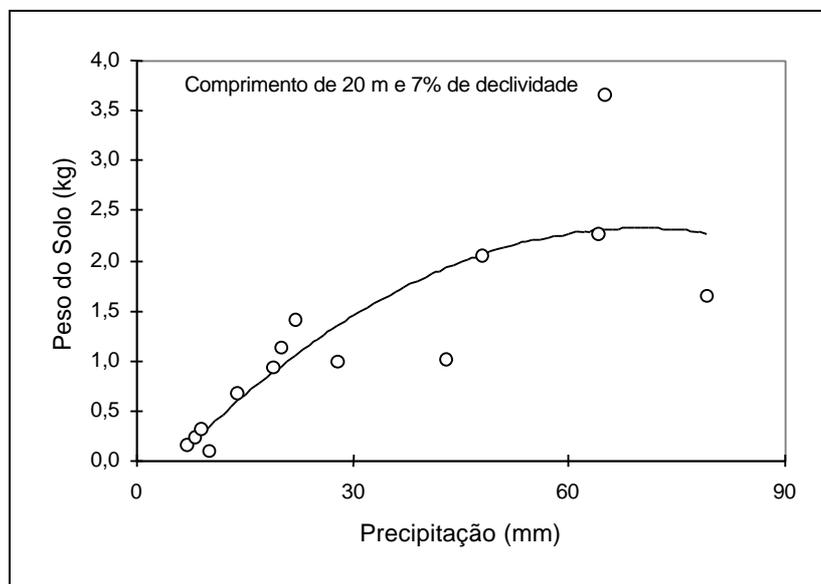
$$\hat{Y} = -0,08131 + 0,01778**P \quad R^2 = 0,815$$

Figura 41 – Estimativa do peso de solo erosionado no segmento de estrada com 20 m de comprimento e 1% de declividade, em função da precipitação.



$$\hat{Y} = -244,0360 + 47,7696**P - 0,3907**P^2 \quad R^2 = 0,919$$

Figura 42 – Estimativa do volume de enxurrada no segmento de estrada com 20 m de comprimento e 7% de declividade, em função da precipitação.



$$\hat{Y} = -0,3884 + 0,07779**P - 0,0005581**P^2 \quad R^2 = 0,729$$

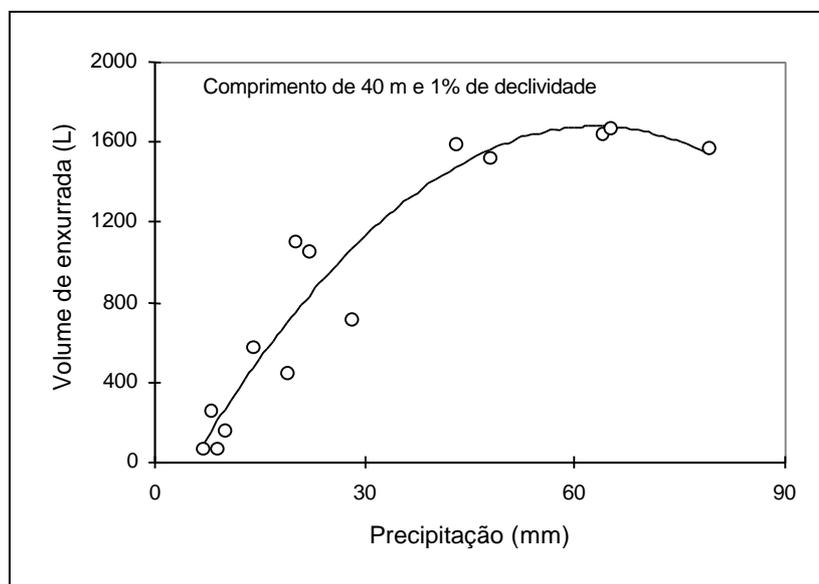
Figura 43 – Estimativa do peso de solo erodido no segmento de estrada com 20 m de comprimento e 7% de declividade, em função da precipitação.

Através da equação de regressão, foi determinada a precipitação de 62,87 mm, que gerou o volume máximo de enxurrada no segmento de estrada com 40 m de comprimento e declividade de 1%. Na Figura 44, pode-se observar que, à medida que a precipitação aumenta, ocorre aumento quadrático do volume de enxurrada.

A precipitação de 67,21 mm gerou o peso máximo de solo erosionado no segmento de estrada com 40 m de comprimento e declividade de 1%. Pode-se observar na Figura 45 que, com o aumento da precipitação, ocorre aumento quadrático do peso de solo erosionado.

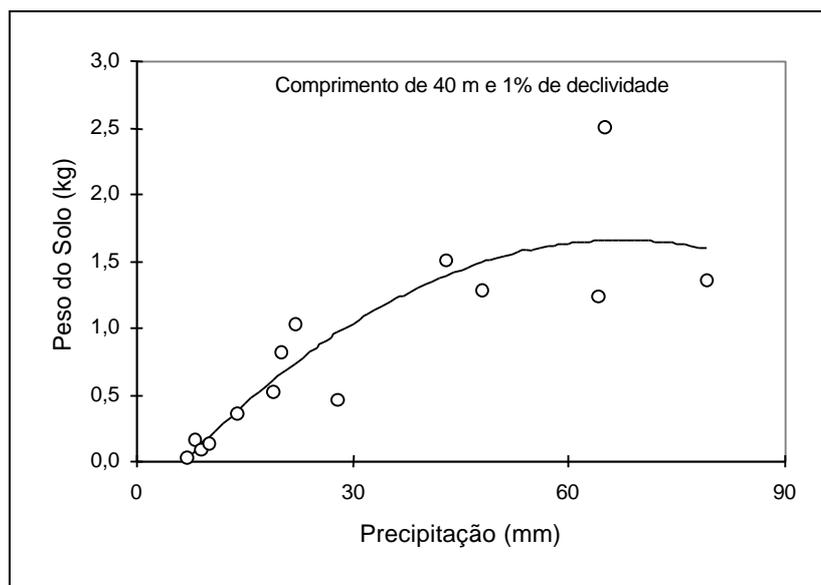
No segmento de estrada com 40 m de comprimento e 7% de declividade, o volume máximo de enxurrada foi observado na precipitação de 68,46 mm. Observa-se, na Figura 46, que ocorre aumento quadrático no volume de enxurrada à medida que o volume de precipitação aumenta.

O peso máximo de solo erosionado foi encontrado no volume de 61,01 mm de precipitação, para o segmento de estrada com 40 m de comprimento e declividade de 7%. Conforme a Figura 47, o peso do solo aumenta em função do aumento da precipitação, seguindo uma tendência quadrática.



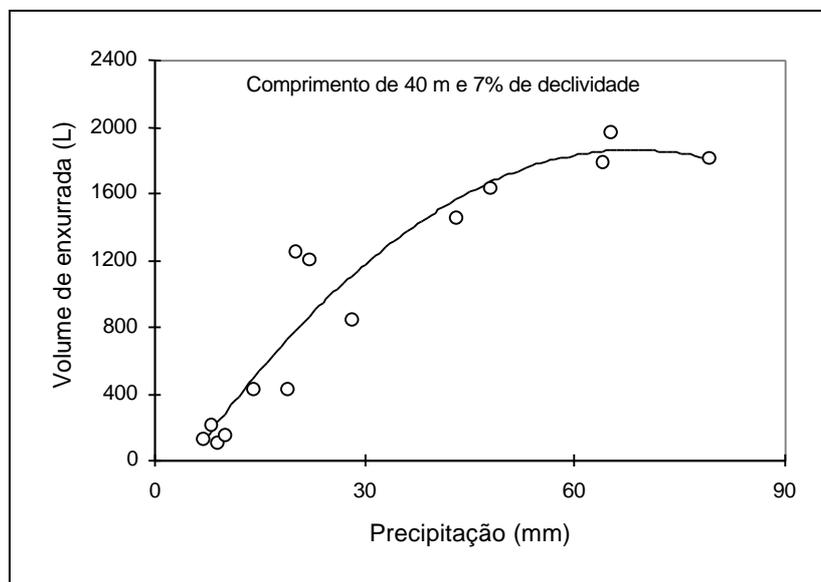
$$\hat{Y} = -327,1540 + 63,7649 ** P - 0,5071 ** P^2 \quad R^2 = 0,916$$

Figura 44 – Estimativa do volume de enxurrada no segmento de estrada com 40 m de comprimento e 1% de declividade, em função da precipitação.



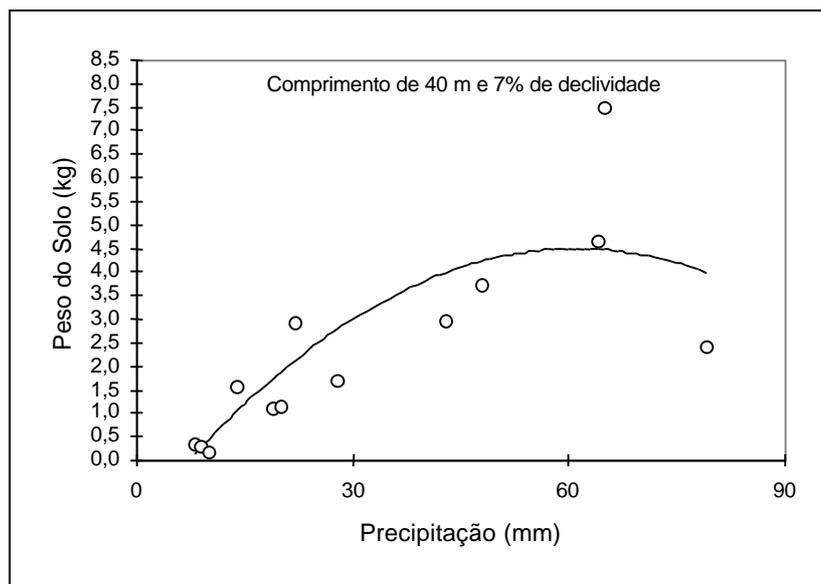
$$\hat{Y} = -0,3816 + 0,06065 **P - 0,0004512 **P^2 \quad R^2 = 0,785$$

Figura 45 – Estimativa do peso de solo erodido no segmento de estrada com 40 m de comprimento e 1% de declividade, em função da precipitação.



$$\hat{Y} = -313,5140 + 63,5627 **P - 0,4642 **P^2 \quad R^2 = 0,912$$

Figura 46 – Estimativa do volume de enxurrada no segmento de estrada com 40 m de comprimento e 7% de declividade, em função da precipitação.



$$\hat{Y} = -1,3036 + 0,1901 ** P - 0,001558 ** P^2 \quad R^2 = 0,713$$

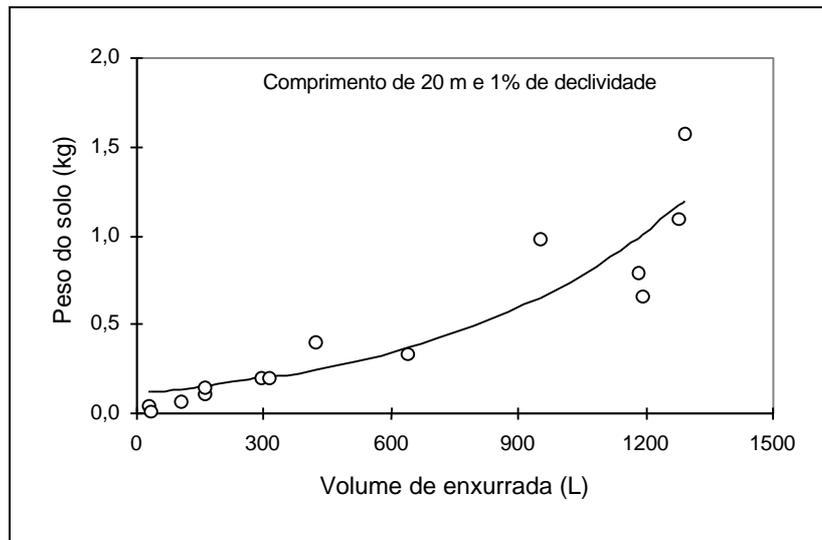
Figura 47 – Estimativa do peso de solo erosionado no segmento de estrada com 40 m de comprimento e 7% de declividade, em função da precipitação.

#### 4.4. Estimativas do peso do solo em função do volume de enxurrada

À medida que o volume de enxurrada aumenta, ocorre aumento de sua velocidade, favorecendo o transporte de sedimentos; como consequência, o peso do solo erosionado cresce exponencialmente em função do incremento no volume de enxurrada. Esse comportamento é comum aos quatro tratamentos - comprimento de 20 m e 1% de declividade, comprimento de 20 m e 7% de declividade, comprimento de 40 m e 1% de declividade e comprimento de 40 m e 7% de declividade - e pode ser observado nas Figuras 48, 49, 50 e 51.

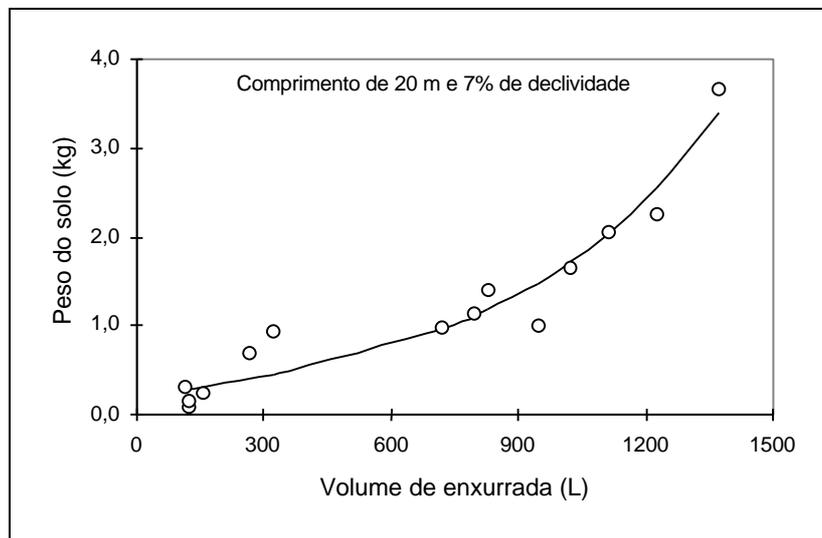
O comportamento do peso do solo em função do volume de enxurrada nos quatro tratamentos é demonstrado na Figura 52.

Na Figura 52, pode-se observar que variações na declividade exercem maior influência no peso do solo que variações no comprimento do segmento. No entanto, variações no comprimento do segmento exercem maior influência no volume de enxurrada que variações na declividade.



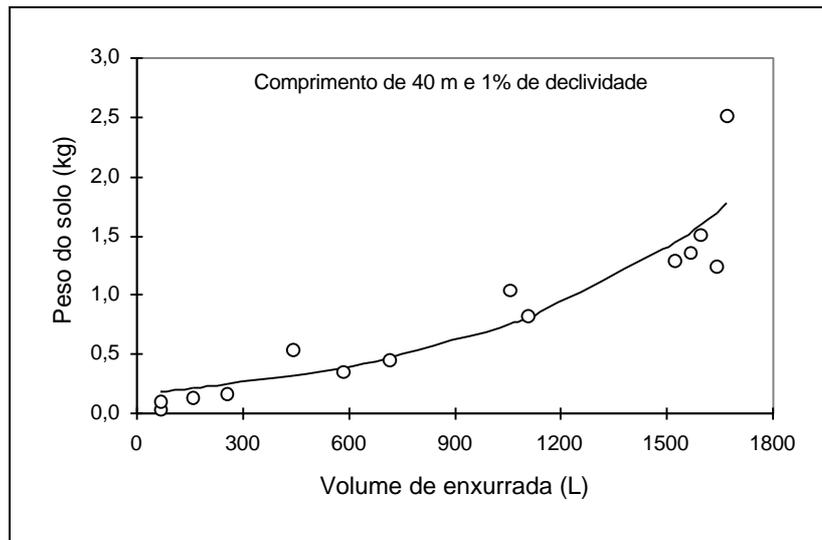
$$\hat{Y} = 0,115514 * 1,001814^{Ve} \quad R^2 = 0,842$$

Figura 48 – Estimativa do peso do solo no segmento de estrada com 20 m de comprimento e 1% de declividade, em função do volume de enxurrada.



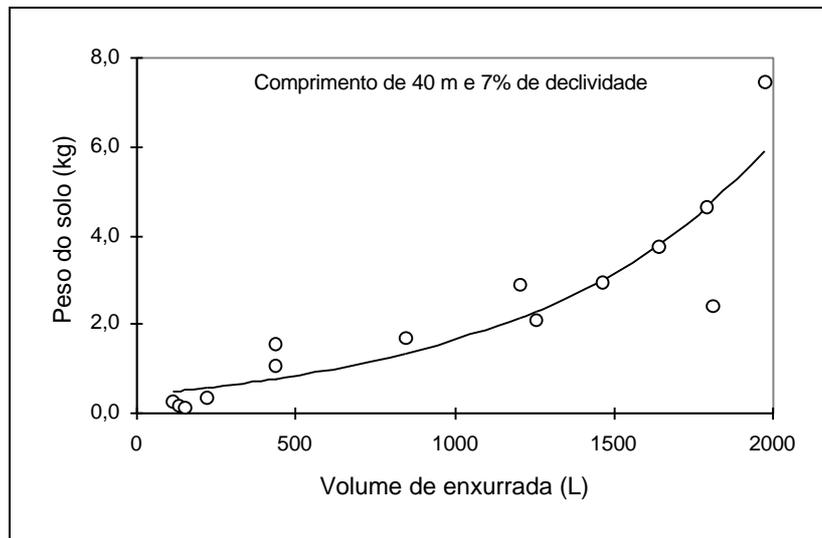
$$\hat{Y} = 0,23528 * 1,001947^{Ve} \quad R^2 = 0,935$$

Figura 49 – Estimativa do peso do solo no segmento de estrada com 20 m de comprimento e 7% de declividade, em função do volume de enxurrada.



$$\hat{Y} = 0,17074 * 1,0014^{Ve} \quad R^2 = 0,849$$

Figura 50 – Estimativa do peso do solo no segmento de estrada com 40 m de comprimento e 1% de declividade, em função do volume de enxurrada.



$$\hat{Y} = 0,429155 * 1,001331^{Ve} \quad R^2 = 0,820$$

Figura 51 – Estimativa do peso do solo no segmento de estrada com 40 m de comprimento e 7% de declividade, em função do volume de enxurrada.

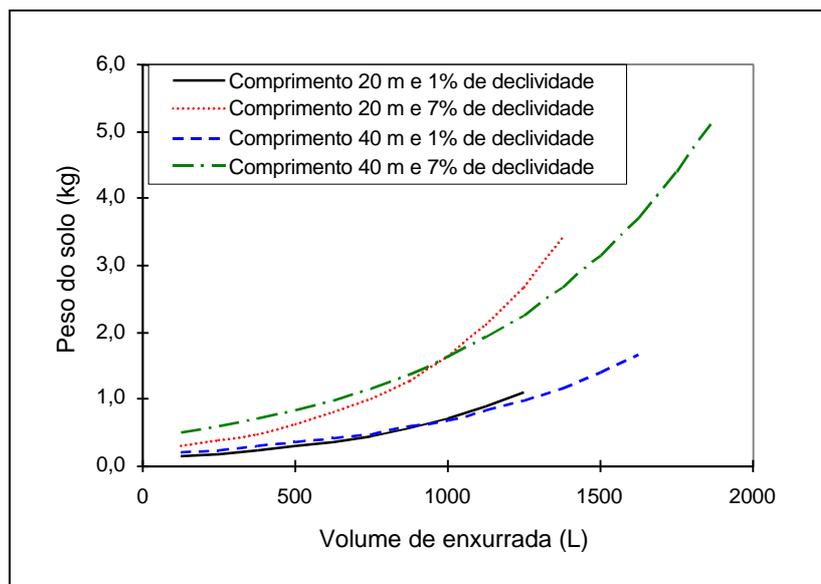


Figura 52 – Estimativa do peso do solo nos segmentos de estrada com 20 e 40 m de comprimento e 1 e 7% de declividade, em função do volume de enxurrada.

#### 4.5. Comparação entre valores observados e valores preditos pelo WEPP

O somatório das precipitações observadas foi utilizado na determinação do volume de enxurrada e peso do solo nas predições do modelo WEPP. Os valores de volume de enxurrada e peso do solo preditos pelo modelo WEPP e os dados observados são demonstrados no Quadro 5.

Quadro 5 – Volume de enxurrada (VE) e peso do solo (PS) observados e preditos pelo modelo WEPP nos comprimentos do segmento de 20 e 40 m e nas declividades de 1 e 7%

Tratamentos	Veobs (L)	Vewepp (L)	Psobs (kg)	Pswepp (kg)
C20D1	8.052,86	17.780,10	6,615	0,540
C20D7	9.114,33	21.871,27	16,628	17,747
C40D1	12.453,02	35.051,46	11,519	1,397
C40D7	13.467,72	43.644,78	31,534	69,453

Nas Figuras 53 e 54, podem-se observar as comparações do volume de enxurrada e peso do solo entre os dados observados e aqueles preditos pelo modelo WEPP nos diferentes tratamentos: comprimento de 20 m e declividade de 1%, comprimento de 20 m e declividade de 7%, comprimento de 40 m e declividade de 1% e comprimento de 40 m e declividade de 7%.

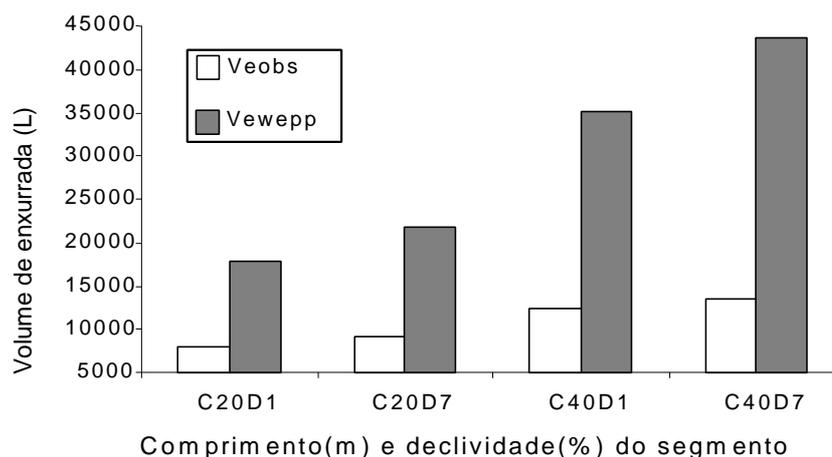


Figura 53 – Volume de enxurrada observado e predito pelo modelo WEPP nos comprimentos do segmento de 20 e 40 m e nas declividade de 1 e 7%.

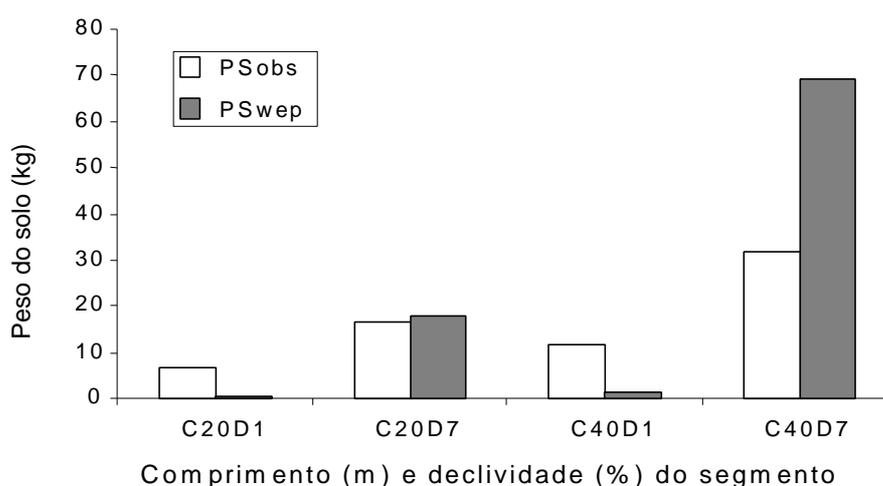


Figura 54 – Peso do solo observado e predito pelo modelo WEPP nos comprimentos do segmento de 20 e 40 m e nas declividade de 1 e 7%.

Os valores de volume de enxurrada preditos pelo modelo WEPP nos segmentos de 20 m de comprimento e 1% de declividade, 20 m de comprimento e 7% de declividade, 40 m de comprimento e 1% de declividade e 40 m de comprimento e 7% de declividade foram, respectivamente, 120,79; 139,97; 181,47; e 224,07% maiores que os observados.

Os valores observados de peso do solo nos segmentos de 20 m de comprimento e 1% de declividade e 40 m de comprimento e 1% de declividade foram, respectivamente, 1.125,09 e 724,41% maiores que aqueles fornecidos pelo modelo WEPP. No entanto, os valores de peso do solo preditos pelo modelo WEPP nos segmentos de 20 m de comprimento e 7% de declividade e 40 m de comprimento e 7% de declividade foram 6,73 e 120,25% maiores que os observados. Essas diferenças demonstram a necessidade de calibração das variáveis do modelo, uma vez que os arquivos de solo e clima utilizados foram adaptados para a área experimental. Observa-se, no Quadro 5, que o modelo comportou-se de forma não-satisfatória e com predições de perda de solo extremamente adversas das observadas na menor declividade; possivelmente em terrenos planos ele se torna ineficiente, subestimando as perdas.

É importante salientar que o modelo brasileiro de predição de erosão pela água (WEPP – Brasil) não se encontra totalmente calibrado para nossas condições.

Os dados de perda de solo preditos pelo modelo foram, em sua maioria, discrepantes dos observados, aproximando-se significativamente apenas no comprimento do segmento de 20 m e na declividade de 7%. No entanto, o modelo comportou-se de forma aceitável na predição de volume de enxurrada, apesar da diferença média de 166,58% em relação aos dados observados.

## 5. CONCLUSÕES

Foram extraídas do trabalho as seguintes conclusões:

- Nos valores observados de volume de enxurrada, o efeito de comprimento do segmento de estrada foi significativo, ao passo que o efeito de declividade não apresentou diferença significativa.
- Nos valores observados de peso do solo, o efeito de declividade do segmento foi mais significativo que o efeito de comprimento.
- Nos valores de volume de enxurrada e peso do solo preditos pelo modelo WEPP, o efeito de declividade do segmento foi mais significativo que o efeito de comprimento.
- À medida que se aumentou a precipitação, ocorreu aumento quadrático do volume de enxurrada observado em todos os tratamentos.
- À medida que a precipitação aumentou, houve aumento linear do peso do solo observado no comprimento do segmento de 20 m e 1% de declividade; entretanto, nos outros tratamentos, o aumento no peso do solo observado foi quadrático.
- Em todos os tratamentos, o peso do solo observado cresceu exponencialmente em função do incremento no volume de enxurrada.
- Na validação do modelo WEPP, os valores preditos de volume de enxurrada foram, em média, 166,58% superiores aos dados observados.
- Os valores observados de peso do solo na declividade de 1% apresentaram variação superior de 1125,09% no segmento de estrada com 20 m de

comprimento e de 724,41% no segmento com 40 m de comprimento, em relação aos valores preditos pelo modelo WEPP. Concluiu-se que, nas menores declividades, o modelo comportou-se de forma não-satisfatória, subestimando as perdas.

- Os valores de peso do solo preditos pelo modelo WEPP na declividade de 7% apresentaram variação superior de 6,73% no segmento de estrada com 20 m de comprimento e de 120,25% no segmento com 40 m de comprimento, em relação aos valores observados.

- O modelo brasileiro de predição de erosão pela água (WEPP – Brasil) não se encontra totalmente calibrado para nossas condições.

Por fim, conclui-se pela necessidade de levar em consideração as seguintes recomendações:

- Em virtude da elevada variabilidade dos dados de volume de enxurrada e peso do solo, há necessidade de se aumentar o número de observações, ou seja, da quantidade de eventos de chuva, que pode ser obtido com coletas sucessivas feitas ao longo dos anos.

- É necessário envolver, em futuras pesquisas, variações na cobertura da sarjeta, incluindo pedras e vegetação.

- O modelo WEPP, por sua vez, necessita de calibração tanto em termos de volume de enxurrada quanto em peso do solo; os valores de peso do solo nas menores declividades (terrenos planos) requerem maiores ajustes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACRA, A. M. **Captação e aproveitamento de águas pluviais das estradas**. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Coordenadoria de Assistência Técnica e Integral. 1984. 12 p. (Boletim técnico).

ANGULO FILHO, R.; ELLIOT, W. J.; DECHEN, S. C. F.; LOMBARDI NETO, F. Utilização do modelo “WEPP” para simulação de erosão no Brasil – Estudo preliminar. Piracicaba, v. 3, n. 1, p. 65-79, 1992.

ASSIS, A. F. F. **O solo e as práticas de controle à erosão**. Campinas, SP, Coordenadoria de Assistência Técnica Integral – CATI, 1973. p. 13-17.

AZEVEDO NETTO, J. M.; ALVAREZ, G. A. **Manual de Hidráulica**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1994. p. 570-584.

BERTOLINI, D.; DRUGOWICH, M. I.; LOMBARDI NETO, F.; BELLINAZZI JÚNIOR, R. **Controle de erosão em estradas rurais**. Campinas, Coordenadoria de Assistência Técnica Integral – CATI, 1993. 37p. (Boletim Técnico, 207).

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo : Ícone, 1990. p. 75-82.

BURROUGHS JR, E. R.; KING, J. G. Reduction of soil erosion on forest roads. Ogden, UT: Intermountain Research Station, General Technical Report INT-264. 1989.

BURROUGHS JR, E. R.; LUCE, C. H.; PHILLIPS, F. Estimating interrill erodibility of forest soils. **Transactions of the ASAE**, v. 35, n. 5, p. 1489-1495, 1992.

CHAVES, H. M. L. **O modelo WEPP e sua aplicação no Brasil: I. Descrição do modelo.** Campinas: IAC, 1992. p. 41-43 (Boletim informativo).

CHAVES, H. M. L. Modelagem matemática da erosão hídrica: passado, presente e futuro. In: ALVAREZ V. H.; FONTES, L. E.; FONTES, M. P. F. (Eds.) **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado.** Viçosa: SBCS, UFV, DPS, 1996. p. 731-750.

CHAVES, H. M. L.; NEARING, M. A. Uncertainly analysis of the WEPP soil erosion model. **Trans. of the ASAE**, v. 34, n. 6, p. 2437-2444, 1991.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº 001/86. Brasília, 1986.

DADALTO, G. G.; CARMO FILHO, O. G.; CASTRO, L. L. F. **Captção de águas pluviais das estradas vicinais.** Vitória, ES: EMCAPA, 1990. 22 p. (EMCAPA – Documentos, 63).

ELLIOT, W. J.; FOLTZ, R. B.; LUCE, C. H. Validation of Water Erosion Prediction Project (WEPP) model for low-volume forest roads. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LOW-VOLUME ROADS, 6, 1995, Washington, D.C. **Proceedings...** Washington, D.C.: National Academy Press. 1995. p. 178-186.

ELLIOT, W. J.; FOLTZ, R. B.; LUCE, C. H. Predicting the impacts of forest roads on the environment. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 3, 1997, Vitória, ES. **Anais...** Viçosa: SIF, 1997. p. 99-119.

ELLIOT, W. J.; FOLTZ, R. B.; LUCE, C. H.; KOLER, T.E. Computer-aided risk analysis in road decommissioning. In: AWRA WATERSHED RESTORATION MANAGEMENT: PHYSICAL, CHEMICAL AND BIOLOGICAL CONSIDERATIONS, 1996, Syracuse. **Proceedings...** Syracuse: AWRA. 1996. p. 341-350.

ELLIOT, W. J.; FOLTZ, R.B.; REMBOLDT, M. D. Predicting sedimentation from roads at stream crossings with the WEPP model Presented at the 1994 ASAE International Winter Meeting, Paper 947511, ASAE, St. Joseph, MI. 10 p. 1994.

ELLIOT, W. J.; HALL, D. E. Water Erosion Prediction (WEPP) Forest Applications. Ogden, UT: Rocky Mountain Research Station, 1997. (General Technical Report, 365)

ELLIOT, W. J.; LIEBENOW, A. M.; LAFLEN, J. M.; KOHL, K. D. **A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments: 1987 and 1988.** W. Lafayette, USDA-ARS, 1989. p. 442-450.

FERNANDES, E. N. **Sistema inteligente de apoio ao processo de avaliação de impactos ambientais de atividades agropecuárias**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1997. 122 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 1997.

FILHO, N. F.; BRAGA, T. O.; GALVES, M. L.; BITAR, O. Y.; AMARANTE, A. **Alterações no meio físico decorrentes de obra de engenharia**. São Paulo: IPT. 1992. p. 144-145 (Boletim Técnico, 61).

FOLTZ, R. B. Sediment reduction from the use of lowered tire pressures. **SAE 1994 Transactions**, Journal of Commercial Vehicles, Sec. 2, Vol. 103:376-381. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers. 1995.

FOLTZ, R. B. Traffic and no-traffic on an aggregate surfaced road: Sediment production differences. In: SEMINAR ON ENVIRONMENTALLY SOUND FOREST ROADS AND WOOD TRANSPORT, SINAIA, ROMANIA, 1996, Rome. **Proceedings...** Rome: FAO, 1996.

FOLTZ, R. B.; TRUEBE, M. Effect of aggregate quality on sediment production from a forest road. In: Sixth International Conference on Low-Volume Roads, Transportation Research Board, 1:49-57. 1995.

FOLTZ, R. B.; ELLIOT, W. J. Measuring and modeling impacts of tire pressure on road erosion. In: SEMINAR ON ENVIRONMENTALLY SOUND FOREST ROADS AND WOOD TRANSPORT, SINAIA, ROMANIA, 1996, Rome. **Proceedings...** Rome: FAO, 1996.

FOSTER, G. R.; LANE, L. J. Beyond the USLE: Advancements in soil erosion prediction, In: BOERSMA, L. L. (Ed.). **Future developments in soil science research**. Madison: Soil Sci. Am. Soc., 1987. p. 315-326.

FOSTER, G. R.; LANE, L. J.; NEARING, M. A.; FINKNER, S. C.; FLANAGAN, D. C. Erosion component. In: **Lane e Nearing, eds. USDA – Water Erosion Prediction Project : hillslope profile model documentation**. West Lafayette, 1989. p. 10.1-10.12 (NSERL Report, 2).

HARTSOG, W. S.; GONSIOR, M. J. Analysis of construction and initial performance of the China Glen Road, Warren District, Payette National Forest. General Technical Report INT-5. Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 22 p. 1973.

JOHNSTON, J. P. Environmental guidelines for logging in the seventies. **Loggers Handbook**, n. 27, p. 61-66, 1976.

LAFLEN, J. M.; ELLIOT, W. J.; FLANAGAN, M. C. R.; NEARING, M. A. WEPP – predicting water erosion using a process-based model. **Journal of Soil and Water Cons.**, v. 52, n. 2, p. 96-102, 1997.

LANE, L. J.; NEARING, M. A. USDA – Water erosion prediction project: hillslope profile model documentation. West Lafayette, 1989. (NSERL Report, 2).

LIRA FILHO, J. A.; SOUZA, A. P. Avaliação do impacto da exploração florestal no meio ambiente. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE EXPLORAÇÃO E TRANSPORTE FLORESTAL, 1, 1991, Viçosa, MG. **Anais...** Viçosa, MG: SIF, 1991. p. 94-112.

LUCE, C. H. **Proposal for a study on sediment production from forest roads under natural rainfall conditions.** USDA. Forest Service Intermountain Research Station. Moscow, USA, 1993. p. 1-7.

LUCE, C. H. Effectiveness of road ripping in restoring infiltration capacity. **Restoration Ecology**, v. 5, n. 3, 1997.

LUCE, C. H.; BLACK, T. A. **Sediment production from forest roads in Western Oregon.** Under Review, Moscow ID: Rocky Mountain Research Station., USA. p. 1-15. 1997.

LUCE, C. H.; CUNDY, T. W. Parameter identification for a runoff model for forest roads. **Water Resources Research**, v. 43, n. 4, p. 1057-1069, 1994.

MACHADO, C. C.; MALINOVSKI, J. R. **Rede viária florestal.** Curitiba: FUPEF 1986. p. 26-32.

MACHADO, C. C.; SOUZA, A. P. **Impacto ambiental das estradas florestais: causas e controle.** Viçosa, MG: SIF, 1990. p. 1-12 (Boletim Técnico, 1).

McCOOL, D. K.; FOSTER G. R.; MUTCHLER, C. K.; MEYER, L. D. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 32, n. 5, p. 1571-1576, 1989.

MEGAHAN, W. F. **Erosion over time: A model.** USDA. Forest Service Research Pap. INT-156. Intermountain Research Station, Ogden, Utah, USA, 1974.

MEGAHAN, W. F. **Reducing erosional impacts of roads.** Rome: FAO, 1977. 57 p.

MEGAHAN, W. F. Increased sedimentation following helicopter logging and prescribed burning on granitic soil. In: BESCHTA, R.L., BLINN, T., GRANT, G.E.; SWANSON, F. J.; ICE, G.G. (Eds.) **Erosion and sedimentation in the Pacific Rim: symposium proceedings.** Corvallis, OR. IAHS Publ. 165. Wallingford, Oxfordshire, UK: International Association for Hydrological Sciences Press: 1987. p. 259-260.

MEGAHAN, W. F.; KIDD, W. F. **Effect of logging roads on sediment production rates in the Idaho Batholith**. USDA. Forest Service Research. Pap. INT – 123. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah, USA, 1972.

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

MOTTA, L. P. **Avaliação de impactos ambientais da malha rodoviária florestal**. Viçosa, MG, UFV, 1993. 12 p. (Monografia).

NEARING, M.A. A single continuous function for slope steepness influence on soil loss. **Soil Sci Am. Journal**, n. 61, p. 917-919, 1997.

NEARING, M. A.; FOSTER, G. R.; LANE, L. J.; FINKNER, S. C. A process-based soil erosion model for USDA – Water Erosion Prediction Project Technology. **Trans. of the ASAE**, v. 32, n. 5, p. 1587-1593, 1989.

PACKER, P. E.; CHRISTENSEN, G. F. Guides for controlling sediment from secondary logging roads. Ogden, UT: Intermountain Forest and Range Experiment Station. 42 p. 1977.

PEARCE, J. K.; STENZEL, G. **Logging and pulpwood production**. New York: John Wiley & Sons, 1972. 453 p.

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

SILVA, E. **Avaliação qualitativa de impactos ambientais do reflorestamento no Brasil**. Viçosa, MG: UFV, 1994. 309 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 1994.

SOUZA, A. P.; MACHADO, C. C.; GRIFFITH, J. J.; NEVES, A. R. Impactos ambientais da exploração florestal e procedimentos para seu controle. In: **Exploração e transporte florestal**. Viçosa, MG: SIF, 1991. p. 13-24 (Boletim Técnico, 3).

SWIFT JR, L. W. Soil losses from roadbeds and cut and fill slopes in the southern Appalachian Mountains. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 8, n. 4, p. 209-213, 1984.

TEIXEIRA, S. G. Impactos ambientais associados ao transporte rodoviário. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 2, 1995, Salvador. **Anais...** Viçosa, MG: SIF, 1995. p. 142-153.

TUCHY, E. Forestry ecology in mountains areas. In: LOGGING IN MOUNTAINS FORESTS. Rome: FAO, 1982. p. 9-14.

TYSDAL, L.; ELLIOT, B.; LUCE, C.; BLACK, T. Modeling insloping road erosion processes with the WEPP watershed model. Presented at the 1997 ASAE International Meeting, Paper 975014. St. Joseph, MI: ASAE. 14p. 1997.

ULMAN, P.; LOPES, V.; LUCE, C. H. Evaluation of interrill erodibility for improved erosion prediction models. Technical Report of Agreement No. INT-92716-RJVA. Ogden, UT: USDA Forest Service Intermountain Research Station. 1994.

Von SPERLING, E. **Módulo 5: Qualidade da Água.** In: CURSO DE TUTORIA À DISTÂNCIA. Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior (ABEAS), Brasília, DF. 1997. p. 32-57.

WEMPLER, B. C. Hydrologic integration of forest roads with stream networks in two basins, Western Cascades, Oregon. Master of Science Thesis, Oregon State University, Corvallis, OR. 1994.

ZIMMERMANN, R. C. **Impactos ambientales de las actividades forestales.** Roma, FAO, 1983. 80 p.

## APÉNDICE

Quadro 1A – Desdobramento da declividade dentro de comprimento e de precipitação

FV	GL	QM VE	GL	QM PS
D/C20 P7	1	15.726,51 <sup>ns</sup>	1	0,036033 <sup>ns</sup>
D/C20 P8	1	4.990,00 <sup>ns</sup>	1	0,062056 <sup>ns</sup>
D/C20 P9	1	14.139,74 <sup>ns</sup>	1	0,152984 <sup>ns</sup>
D/C20 P10	1	3.220,03 <sup>ns</sup>	1	0,000476 <sup>ns</sup>
D/C20 P14	1	4.045,05 <sup>ns</sup>	1	0,474769 <sup>ns</sup>
D/C20 P19	1	50.789,63 <sup>ns</sup>	1	1,257490 <sup>ns</sup>
D/C20 P20	1	48.063,93 <sup>ns</sup>	1	1,310151 <sup>ns</sup>
D/C20 P22	1	332.450,80 <sup>**</sup>	1	2,020852 <sup>*</sup>
D/C20 P28	1	363.847,10 <sup>**</sup>	1	1,256636 <sup>ns</sup>
D/C20 P43	1	78,19 <sup>ns</sup>	1	0,001462 <sup>ns</sup>
D/C20 P48	1	13.648,83 <sup>ns</sup>	1	3,914076 <sup>**</sup>
D/C20 P64	1	3.386,23 <sup>ns</sup>	1	4,357591 <sup>**</sup>
D/C20 P65	1	13.130,09 <sup>ns</sup>	1	8,801131 <sup>**</sup>
D/C20 P79	1	133.174,40 <sup>ns</sup>	1	0,615775 <sup>ns</sup>
D/C40 P7	1	7.803,12 <sup>ns</sup>	1	0,048416 <sup>ns</sup>
D/C40 P8	1	2.497,83 <sup>ns</sup>	1	0,062126 <sup>ns</sup>
D/C40 P9	1	3.590,86 <sup>ns</sup>	1	0,063270 <sup>ns</sup>
D/C40 P10	1	76,63 <sup>ns</sup>	1	0,000945 <sup>ns</sup>
D/C40 P14	1	44.758,84 <sup>ns</sup>	1	2,950921 <sup>**</sup>
D/C40 P19	1	187,99 <sup>ns</sup>	1	0,612171 <sup>ns</sup>
D/C40 P20	1	46.104,69 <sup>ns</sup>	1	3,261219 <sup>**</sup>
D/C40 P22	1	46.106,23 <sup>ns</sup>	1	7,003927 <sup>**</sup>
D/C40 P28	1	34.708,20 <sup>ns</sup>	1	3,043282 <sup>**</sup>
D/C40 P43	1	35.544,43 <sup>ns</sup>	1	4,243012 <sup>**</sup>
D/C40 P48	1	27.798,47 <sup>ns</sup>	1	11,977570 <sup>**</sup>
D/C40 P64	1	45.023,97 <sup>ns</sup>	1	23,203080 <sup>**</sup>
D/C40 P65	1	179.448,40 <sup>*</sup>	1	49,470250 <sup>**</sup>
D/C40 P79	1	116.297,00 <sup>ns</sup>	1	2,201915 <sup>*</sup>
Res. comb.	109	43.022,41	137	0,368571

\*\* F significativo a 1% de probabilidade.

\* F significativo a 5% de probabilidade.

<sup>ns</sup> F não-significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 2A – Desdobramento do comprimento dentro de declividade e de precipitação

FV	GL	QM VE	GL	QM PS
D/C20 P7	1	4.664,52 <sup>ns</sup>	1	0,003280 <sup>ns</sup>
D/C20 P8	1	35.698,13 <sup>ns</sup>	1	0,019693 <sup>ns</sup>
D/C20 P9	1	5.427,07 <sup>ns</sup>	1	0,006918 <sup>ns</sup>
D/C20 P10	1	8.754,18 <sup>ns</sup>	1	0,007575 <sup>ns</sup>
D/C20 P14	1	147.296,90 <sup>ns</sup>	1	0,047697 <sup>ns</sup>
D/C20 P19	1	159.804,60 <sup>ns</sup>	1	0,297556 <sup>ns</sup>
D/C20 P20	1	437.795,30 <sup>**</sup>	1	0,459345 <sup>ns</sup>
D/C20 P22	1	805.650,10 <sup>**</sup>	1	0,801004 <sup>ns</sup>
D/C20 P28	1	354.553,50 <sup>**</sup>	1	0,129743 <sup>ns</sup>
D/C20 P43	1	828.107,20 <sup>**</sup>	1	0,551497 <sup>ns</sup>
D/C20 P48	1	216.630,10 <sup>*</sup>	1	0,792530 <sup>ns</sup>
D/C20 P64	1	418.205,50 <sup>**</sup>	1	0,395127 <sup>ns</sup>
D/C20 P65	1	289.218,20 <sup>*</sup>	1	1,759087 <sup>*</sup>
D/C20 P79	1	166.660,80 <sup>ns</sup>	1	0,142444 <sup>ns</sup>
D/C40 P7	1	76,75 <sup>ns</sup>	1	0,000478 <sup>ns</sup>
D/C40 P8	1	10.509,86 <sup>ns</sup>	1	0,026884 <sup>ns</sup>
D/C40 P9	1	18,76 <sup>ns</sup>	1	0,000794 <sup>ns</sup>
D/C40 P10	1	6.813,90 <sup>ns</sup>	1	0,017987 <sup>ns</sup>
D/C40 P14	1	55.616,13 <sup>ns</sup>	1	1,555472 <sup>*</sup>
D/C40 P19	1	25.817,87 <sup>ns</sup>	1	0,042651 <sup>ns</sup>
D/C40 P20	1	431.841,20 <sup>**</sup>	1	1,792965 <sup>*</sup>
D/C40 P22	1	286.994,00 <sup>*</sup>	1	4,494040 <sup>**</sup>
D/C40 P28	1	31.879,38 <sup>ns</sup>	1	0,967670 <sup>ns</sup>
D/C40 P43	1	533.358,60 <sup>**</sup>	1	7,641111 <sup>**</sup>
D/C40 P48	1	560.989,50 <sup>**</sup>	1	5,629716 <sup>**</sup>
D/C40 P64	1	641.096,80 <sup>**</sup>	1	11,276600 <sup>**</sup>
D/C40 P65	1	717.099,00 <sup>**</sup>	1	29,086010 <sup>**</sup>
D/C40 P79	1	1.241.431,00 <sup>**</sup>	1	1,159045 <sup>ns</sup>
Res. comb.	109	43.022,41	137	0,368571

\*\* F significativo a 1% de probabilidade.

\* F significativo a 5% de probabilidade.

<sup>ns</sup> F não-significativo a 5% de probabilidade.