

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

UM ESTUDO DA EROSIÃO E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS PE
LAS CHUVAS

por

VICENTE LÚCIO LOPES

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA

OUTUBRO - 1980



L864e Lopes, Vicente Lúcio.
Um estudo da erosão e produção de sedimentos pelas chuvas / Vicente Lúcio lopes. - Campina Grande, 1980. 70 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1980.
"Orientação : Prof. Dr. Vajapeyam Srirangachar Srinivasan".
Referências.

1. Solo (Agricultura). 2. Pedologia (Ciência do Solo). 3. Hidráulica Agrícola. 4. Dissertação - Engenharia Civil. I. Srinivasan, Vajapeyam Srirangachar. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 631.459(043)

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

UM ESTUDO DA EROÇÃO E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS PE
LAS CHUVAS

VICENTE LÚCIO LOPES

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO
DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DO CEN
TRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FE
DERAL DA PARAÍBA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECES
SÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE "MAGISTER SCIEN
TIAE" (M.Sc.) EM ENGENHARIA DOS RECURSOS HÍDRI
COS.

Aprovado por:

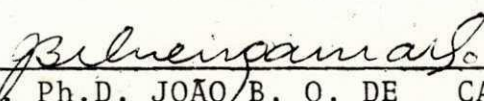
COMISSÃO



PROF. Ph.D. VAJAPEYAM S. SRINIVASAN

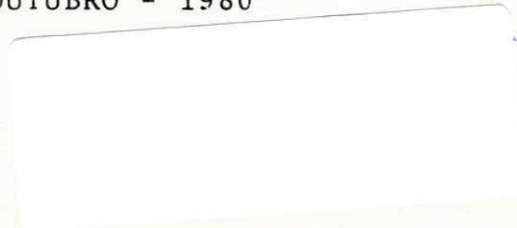


PROF. Ph.D. SEEMANAPALLI V. K. SARMA



PROF. Ph.D. JOÃO B. Q. DE CARVALHO

CAMPINA GRANDE
ESTADO DA PARAÍBA - BRASIL
OUTUBRO - 1980



À Raimundo e Creusa, meus pais.
À Margarida, minha esposa e aos
nossos filhos Ângelo e Helena.

AGRADECIMENTOS

O Autor agradece

Ao Dr. Vajapeyam Srirangachar Srinivasan pela orientação dedicada, segura e paciente, durante a execução deste trabalho.

Ao Centro de Ciências e Tecnologia da UFPb, pelo apoio básico oferecido.

À Escola Superior de Agricultura de Mossoró - ESAM, pela oportunidade concedida.

Aos professores, colegas e a todos aqueles que com compreensão e apoio, contribuíram para a realização deste trabalho.

R E S U M O

Os fenômenos de erosão e produção de sedimentos pelas chuvas são avaliados com base no desenvolvimento de equações gerais de erosão, a partir de fórmulas de carga do leito para sedimentos fluviais, mediante um procedimento analítico fundamentado nos princípios básicos de hidráulica, sedimentação e mecanismos da erosão.

A verificação das equações obtidas é feita comparando-se valores calculados com registros de erosão previamente publicados por outros autores.

Obtêm-se igualmente equações para declividade crítica e tensão crítica de cisalhamento que possibilitam o estabelecimento das condições para as quais o movimento dos sedimentos se inicia.

A B S T R A C T

The soil erosion and sediment yield by rain phenomena are evaluated on the basis of the adjustment of general erosion equations from bed load formulas for fluvial sediments through an analytical procedure based on basic hydrological principles, sedimentation, and erosion mechanisms.

The verification of the obtained equations is made by comparing the calculated values with the data concerning erosion registered in the literature.

Equally, equations were adjusted for both critical slope and critical shear stress, which make it possible to the establishment of favorable conditions for the start of sediment movement.

NOTAÇÃO

Os seguintes símbolos são usados neste trabalho:

- a_s = fator de proporcionalidade
- C_e = coeficiente de erodibilidade
- C_v = fator de cobertura vegetal
- D_c = taxa de desprendimento pela chuva
- D_f = taxa de desprendimento pelo fluxo
- d_s = diâmetro das partículas
- E_s = taxa de erosão na declividade em peso (ou volume) do material erodido por unidade de área e por unidade de tempo
- e_c = erosividade da chuva
- e_s = erosividade do solo
- f = coeficiente de deflúvio (relação entre a quantidade de chuva que esco superficialmente e a chuva total precipitada).
- g = aceleração da gravidade
- g_s = descarga de sedimentos em peso por unidade de largura por unidade de tempo
- I_m = intensidade média da chuva
- K = constante relativa ao fator de atrito de Darcy-Weisbach
- p = expoente adimensional
- P_s = taxa de captura de sedimentos finos pelo fluxo, em volume por unidade de área e por unidade de tempo.
- q = taxa de fluxo em volume por unidade de largura e por unidade de tempo
- q_* = taxa líquida de entrada lateral de fluxo por unidade de área (no escoamento superficial representa a taxa de entrada de fluxo a partir da chuva, por unidade de área)
- q_o = taxa de fluxo básico por unidade de largura (no escoamento superficial, representa a taxa de entrada de fluxo por unidade de largura, na extremidade superior da declividade)
- q_s = descarga de sedimentos em volume do material por unidade de largura por unidade de tempo
- R_e = número de Reynolds
- S_c = declividade crítica para a qual a erosão torna-se apreciável
- S_f = declividade da linha de energia do fluxo
- S_o = grau de declividade do terreno

S_s = densidade média do sedimento

$U_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ = velocidade de cisalhamento

V = velocidade média do escoamento

x = distância positiva tomada na direção do fluxo ao longo da declividade

y = profundidade do fluxo

γ = peso específico do fluido

γ_s = peso específico do sedimento

ν = viscosidade cinemática do fluido

ρ = massa específica do fluido

τ_0 = tensão de cisalhamento exercida pelo fluxo

τ_c = tensão crítica de cisalhamento a partir da qual o movimento dos sedimentos se inicia

ϕ = parâmetro adimensional da fórmula de Einstein

Ψ = variável adimensional da relação $\Psi - \phi$ na fórmula de Einstein.

Í N D I C E

	Pág.
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	03
2.1. Estado Atual da Pesquisa em Erosão do Solo e Produção de Sedimentos	03
2.2. Modelos de Previsão de Taxas de Erosão e Produção de Sedimentos	09
2.2.1. A Equação Universal de Perda de Solo	10
2.3. Mecanismos da Erosão	12
2.3.1. Fases da Erosão	12
2.3.2. Remoção e Transporte do Solo	14
2.3.2.1. Efeito das Gotas de Chuva	15
2.3.2.2. Efeito do Escoamento Superficial	20
2.3.3. Fatores Intervenientes no Processo de Erosão	21
2.3.4. Efeitos Gerais da Erosão	23
2.4. Considerações Finais	23
CAPÍTULO III - DEFINIÇÕES E SUPOSIÇÕES BÁSICAS	25
3.1. Definições	25
3.1.1. Erosão Geológica ou Normal	25
3.1.2. Erosão Acelerada	25
3.1.3. Erosão Bruta	26
3.1.4. Taxa de Erosão	26
3.1.5. Sedimento	26
3.1.6. Produção de Sedimentos	26
3.2. Suposições Básicas	26
CAPÍTULO IV - DERIVAÇÃO DAS EQUAÇÕES GERAIS DE EROSAO	29
4.1. A Equação da Continuidade	29
4.2. Derivação da Equação Geral de Erosão com Base na Fórmula de Shields	30
4.3. Derivação da Equação Geral de Erosão com Base na Fórmula de Kalinske-Brown	35
4.4. Derivação da Equação Geral de Erosão com Base na Fórmula de Einstein-Brown	37
4.5. Comentários sobre o Desenvolvimento Analítico das Equações de Erosão	40

	Pág.
CAPÍTULO V - PREVISÃO DAS TAXAS DE EROSIÃO	42
5.1. Os Dados do Instituto Internacional de Agricultura Tropical da Nigéria	42
5.2. Organização das Parcelas e Medição da Erosão	42
5.3. Limitações dos Dados Publicados	43
5.4. Hipóteses Admitidas na Utilização dos Dados	45
5.4.1. A Distribuição Hipotética das Chuvas Naturais	46
5.4.2. A Duração das Chuvas	46
5.4.3. O Diâmetro Efetivo dos Sedimentos	48
5.4.4. Método de Cálculo da Erosão	49
CAPÍTULO VI - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	55
6.1. Aspectos Gerais	55
6.2. A Seleção das Fórmulas de Carga do Leito	56
6.3. A Expressão para a Tensão de Cisalhamento (τ_0)	57
6.4. A Declividade Crítica (S_c)	57
6.5. Os Coeficientes de Cobertura Vegetal (C_v) e Erodibilidade (C_e)	58
6.5.1. O Fator de Cobertura	58
6.5.2. O Coeficiente de Erodibilidade	59
6.6. A Forma da Declividade	59
6.7. Comparação dos Valores Calculados pelas Equações de Erosão	60
CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	62
7.1. Conclusões	62
7.2. Recomendações	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

É praticamente impossível planejar, projetar, construir ou manter medidas de conservação e controle nas bacias hidrográficas, sem envolver-se diretamente com aspectos relacionados à erosão. Muitos avanços se tem obtido, e muito se tem escrito durante as últimas décadas, sobre os processos de desprendimento, transporte e deposição de sedimentos pela água.

A camada superficial do solo terrestre é continuamente removida e transportada pelo deflúvio superficial até depositar-se nos lagos, açudes, estuários e oceanos. Quando tal processo ocorre sob condições naturais ou não perturbadas, um estado permanente de equilíbrio é estabelecido de modo que não se verifica maiores danos. No entanto, quando esta condição de equilíbrio é perturbada, a erosão cria sérios problemas na agricultura e manejo dos recursos hídricos.

Esta situação se agrava mais ainda pelo manejo inadequado da terra, o qual se deve em geral à ação devastadora do homem no seu desrespeito pelos recursos naturais e, em parte, pela falta de programas agrícolas educacionais que entre outras atividades, atente o agricultor quanto a necessidade de melhor utilizar a água, e o solo.

Grandes dificuldades têm sido encontradas na avaliação quantitativa do processo erosivo, o que se reflete na falta de registros confiáveis. Esta falta de registros e a necessidade de se avaliar as perdas de solo, têm estimulado muitos pesquisadores a tentar de uma forma ou de outra, esti

mar as produções de sedimentos e daí as taxas de erosão. A dificuldade mais séria com a qual os pesquisadores têm se defrontado fica por conta do próprio mecanismo da erosão. Tal qual outras ocorrências naturais, as taxas de erosão somente poderiam ser seguramente previstas, se todas as variáveis envolvidas no processo fossem conhecidas e pudessem ser tomadas em conta.

Pretendendo somar subsídios ao estudo das previsões das taxas de erosão e produção de sedimentos nas bacias hidrográficas, aspecto indispensável ao planejamento conservacionista dos solos e de relevante importância no apoio à elaboração e execução de projetos nas áreas de Engenharia Civil (estruturas hidráulicas) e Agronomia (agropecuários), este trabalho tem por finalidade:

1. Desenvolver equações teóricas gerais para estimar as taxas de erosão do solo, a partir de fórmulas utilizadas para o cálculo da carga de sedimentos fluviais, mediante um procedimento analítico fundamentado nos princípios básicos de hidráulica, sedimentologia e mecanismos da erosão.

2. Verificar a validade das equações obtidas e a adequação das fórmulas de carga de sedimentos utilizados com este propósito, mediante comparação entre valores calculados e registros de erosão previamente publicados por outros autores.

3. Estabelecer uma metodologia para obtenção de modelos analíticos de previsão das taxas de erosão e produção de sedimentos pelas chuvas.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Estado Atual da Pesquisa em Erosão do Solo e Produção de Sedimentos

Os estudos relativos aos processos de erosão e determinação das taxas de perda de solo e produção de sedimentos, têm se acelerado bastante nos últimos anos. Em muitos projetos de conservação de solo e água, tem-se verificado a necessidade cada vez maior de melhor se compreender as complexas interações envolvidas nos processos de desprendimento e movimento do solo, desde a fonte de erosão até o ponto de deposição. Mais recentemente, com o advento de estudos mais avançados relativos ao meio ambiente, a necessidade de se considerar mais amplamente todos os desenvolvimentos propostos e prever o impacto ambiental dos projetos alternativos de conservação de solo e água, tem sido enfatizado nos países desenvolvidos. A nova consciência do imenso volume de erosão advindo das construções urbanas e estradas de rodagem, e seu impacto na sociedade, tem intensificado esta concepção nesses países. Por outro lado, desde que o sedimento é um portador de elementos férteis para a agricultura, maiores prioridades se tem dado aos estudos e pesquisas relativas aos processos de erosão e produção de sedimentos nas bacias. O grande volume de pesquisas em sedimentação hoje existente, é simplesmente o produto de investigações diretas de fases particulares da sedimentação para solucionar problemas específicos. A consideração integrada dos processos de erosão do solo e produção de sedimentos, tornou-se possível graças à habilidade dos computadores em manipular a massa de dados acumulada e, aos mais recentes conhecimentos adquiridos com respeito aos fenô-

menos de desprendimento e transporte das partículas do solo. De um modo geral, mesmo considerando a natureza estocástica de todos os processos de sedimentação (desprendimento, embarque, transporte, deposição e compactação dos sedimentos), os problemas padrões estão sendo cada vez mais solucionados pela aplicação de princípios científicos, do que mesmo pelas equações empíricas tão comumente usadas a bom tempo.

Em geral, as taxas de erosão variam com clima, solo, topografia e manejo da terra. Langbein e Schumm (1958) encontraram que as taxas de erosão e produção de sedimentos nos Estados Unidos, são maiores onde a precipitação efetiva anual está entre 254 e 356 mm. Eles registraram que a produção de sedimentos caía rapidamente tão logo a precipitação efetiva anual diminuía de 254 mm, devido segundo eles, à falta de escoamento superficial para carrear o sedimento. A produção de sedimentos também diminuía geralmente, com quantidades de chuvas superiores a 356 mm por ano, devido o acréscimo de chuva produzir uma densa cobertura vegetal e desse modo diminuindo a erosão.

Fournier (1960), e Corbel (1964), desenvolveram estudos de correlação entre produção média anual de sedimentos e um certo número de parâmetros relacionados a clima e topografia, e ambos demonstraram a existência de grandes influências climáticas no processo de erosão. Corbel (1964), examinou a erosão em quatro zonas de temperatura, usando chuvas de três intensidades diferentes e duas classes de relevo, e encontrou que as taxas de erosão variavam inversamente com a temperatura, sendo mais baixas nos trópicos. Fournier (1960), entretanto, sugeriu que o efeito do clima é inverso, a erosão sendo bem maior nos trópicos úmidos de acordo com a época e decaindo progressivamente das regiões equatoriais para as regiões temperadas e frias. Embora esta divergência de conclusões possa ser resolvida através de análises mais sofisticadas, os dados disponíveis provavelmente negariam esta aproximação. Por exemplo, o modelo padrão que poderia ser usado na previsão da produção de sedimentos, requereria registros hidrológicos detalhados juntamente com as estimativas de um certo número de parâmetros relacionados a solo e vegetação; todavia tais informações são raramente disponíveis.

Muitos esforços têm sido empregados para medir as taxas de erosão atribuídas à chuva e ao escoamento superficial resultante. Mutchler e Larson (1971), quantificaram a erosão por embate das gotículas de chuva em termos do diâmetro efetivo das gotas e profundidade da lâmina d'água retida su

perfunctivamente. Mutchler e Young (1972), mediram a força das gotas e mostraram que a erosão por embate das gotículas é o processo primário de desprendimento do solo e responsável pelo transporte do material erodido entre as áreas compreendidas entre os pequenos córregos (rills), e os micro canais da rede de drenagem superficial. O desprendimento das partículas do solo, resulta segundo Mutchler e Young (1972), da dissipação da energia de impacto das gotas na superfície de um solo saturado, não suficientemente protegido pela vegetação ou pela lâmina d'água retida superficialmente.

Algumas pesquisas atualmente desenvolvidas nos Estados Unidos, se propõem a (1) refinar e ampliar os conhecimentos quanto aos efeitos na erosão da cobertura vegetal e variáveis de manejo em áreas não perturbadas, tais como florestas e pastagens naturais (Wischmeier, 1972) e, (2) avaliar a erodibilidade de um grande número de solos e sub-solos com base nas características físicas e químicas fundamentais do solo. (Wischmeier e Mannering, 1969; Barnett et al., 1971; Wischmeier et al., 1971). Alguns dos resultados já obtidos, são apresentados por Wischmeier e Meyer (1973).

Meeuwig (1970a), encontrou que a taxa de erosão a partir de chuva simulada, aplicada para um grande número de parcelas experimentais (plots) de pequena área ($4,05 \text{ cm}^2$ aproximadamente) em sete locais com pastagens naturais de montanhas nos estados de Utah, Idaho e Montana, nos Estados Unidos, dependia primariamente da porcentagem de solo superficial protegido do impacto direto das gotas por plantas, resíduos vegetais e (em alguns casos), rochas. O teor de matéria orgânica do solo também foi significativamente importante. A presença da matéria orgânica tendia a estabilizar os solos de textura fina, contudo, a relação teor de matéria orgânica-perda de solo para três áreas estudadas, implicou definitivamente em efeitos adversos aos anteriormente postulados. Meeuwig (1970a) supôs então que estes efeitos deviam-se à presença de tegumentos orgânicos hidrofóbicos nas partículas de areia, os quais não somente repeliam a água como também poderiam repelir as próprias partículas arenosas entre si, tomando-as facilmente destacáveis e transportáveis. Meeuwig (1971) em outro trabalho, desenvolveu uma equação de regressão múltipla valiosa que explicou 74% da variação na taxa de erosão do solo em 460 locais diferentes de estudo. A relação entre erosão e cobertura de proteção foi fortemente influenciada pelo grau de declividade. Meeuwig (1971) informa que a erosão em declividade de 5% com 40% de cobertura foi aproximadamente a mesma verificada em declividades de 35% com 80% de cobertura. Grissinger (1972), mostrou que apesar de uma complexa relação

existente, as taxas de erosão, medidas no laboratório, variavam diretamente com o teor de umidade do solo. A admissão de água em solos coesivos produz tensões internas que deveriam ser consideradas com outras forças erosivas. A erodibilidade, porém, diminui com o aumento do tempo de permanência da água no solo, uma vez que, no decorrer do tempo, as forças coesivas vão se restabelecendo e os esforços produzidos pela água adsorvida vão se dissipando. Meeuwig (1970b) mediu taxas de infiltração e erosão do solo na bacia experimental de Davis County em Utah, Estados Unidos, sob condições de chuva simulada. A relação entre a área coberta por plantas e resíduos vegetais e, a área total, explicou 76% das variações observadas nas taxas de erosão. Outros fatores - peso dos resíduos, grau de declividade e teor de matéria orgânica - em combinação com cobertura vegetal, foram responsáveis por 83% das variações nas taxas de erosão. Farmer e Van Haveren (1971), registraram um estudo de laboratório com erosão laminar por embate das gotas de chuva e escoamento superficial, em três solos de montanha. Vários modelos de regressão múltipla foram desenvolvidos para ambos, erosão por embate (gotas de chuva) e erosão pelo fluxo. As variáveis que contribuíram para o aumento da erosão por embate das gotas foram, (1) alta intensidade de chuva; (2) declividades mais íngremes; (3) grande proporção de partículas de solo com diâmetros entre 0,06 e 2 mm; e (4) solos pesados. As variáveis que mais contribuíram no aumento das taxas de erosão superficial foram, (1) alta intensidade de chuva; (2) declividades mais íngremes; e (3) baixa proporção de partículas com diâmetros superiores a 2 mm. As influências da intensidade da chuva e do grau de declividade nas taxas de erosão, foram notadamente bem mais significantes que as de qualquer outra variável do solo. Wilson (1972) defendeu a utilização de um gráfico bi-log de produção média mensal de sedimentos versus produção média mensal de água, como instrumento valioso nos estudos de sedimentação. Nesse gráfico, uma linha ligando meses consecutivos indica o ritmo sazonal da erosão e escoamento superficial de uma bacia. Segundo Wilson (1972), análises qualitativas dessa natureza para rios nos Estados Unidos, mostraram a existência de dois padrões sazonais de produção de sedimentos. Um dos padrões ocorre nas áreas com climas mediterrâneos, o outro, nas áreas com clima continental. Wilson (1972) conclui afirmando que para prever as variações nas produções de sedimentos, tanto no tempo como no espaço, deve-se considerar o tipo de clima e a estacionalidade, bem como uma variedade de fatores não climáticos. Cada fator que afeta a produção de sedimentos deve ser analisado em termos de seus efeitos específicos. Lusby

et al. (1971) compararam mudanças na vegetação, escoamento superficial e produção de sedimentos em bacias com pastoreio e sem pastoreio numa região semi-árida no Oeste do Colorado nos Estados Unidos, durante um período de 12 anos. As produções de sedimentos nas áreas com pastoreio, variaram de cerca de 151% daquelas observadas nas áreas sem pastoreio. Essa diferença foi atribuída, (1) aos efeitos do pisoteio pelo gado, e (2) a um aumento na proporção da área sem vegetação, com considerável diminuição de resíduos vegetais, musgo e cobertura vegetal nas bacias com pastoreio. Renfro (1972) citou as reduções obtidas nas produções de sedimentos a partir da aplicação de várias práticas mecânicas e vegetativas de conservação. Três das quatro estruturas selecionadas de controle de enchentes, mostraram durante um período de 15 a 20 anos, que as produções de sedimentos foram reduzidas de 25 para 60% pela utilização de práticas de conservação e uso adequado da terra. Em várias situações, quando se aplicou em conjunto medidas estruturais e tratamento da terra, as produções de sedimentos foram reduzidas de 60 para 75%. Spaberry e Bowie (1969), registraram as produções de sedimentos de várias bacias experimentais de Pigeon Roost Creek, no nordeste do Mississippi, Estados Unidos. Eles apresentaram uma relação entre produção de sedimentos, medida durante 9 anos para cada uma das 13 estações existentes, e a perda total de solo calculada para aquelas bacias. Os cálculos basearam-se, (1) na área total da bacia; (2) nas áreas cultivadas com declividades iguais e superiores a 2%; e (3) nas áreas sem vegetação. A erosão bruta calculada a partir das duas principais fontes fornecedoras de sedimentos - áreas cultivadas com declividades iguais e superiores a 2%, e áreas sem vegetação - apresentou melhor correlação com a produção total medida, de sedimentos, que a erosão bruta, calculada a partir da área total de contribuição. Além disso, este procedimento reduziu bastante os trabalhos de campo envolvidos no cálculo da erosão bruta da bacia. Flaxman (1972) estudou a acumulação de sedimentos em 28 reservatórios com bacias cujas áreas variavam de alguns acres a cerca de mais de 50 milhas quadradas, em 11 estados no oeste dos Estados Unidos. Seu objetivo era descrever a influência das mudanças no tratamento e uso das terras na produção de sedimentos, utilizando um mínimo possível de variáveis. Uma análise de regressão múltipla mostrou que quatro características da bacia podiam descrever a variação na produção de sedimentos: (1) um fator climático como expressão indireta da cobertura vegetal; (2) a declividade média da bacia; e (3) dois fatores de solo. Uma boa correlação foi obtida entre valores calculados e valores medidos, exceto para si

tuações nas quais as taxas de produção de sedimentos foram inferiores a 1 ton/acre/ano. Um número de outros tipos de dados foi também testado por Flaxman (1972), e encontrado como estatisticamente insignificante. Estes dados incluíram expressões para características topográficas, outras características do solo além das usadas na análise, e, variáveis climáticas tidas como indicativas da intensidade de chuva e do escoamento superficial. Anderson (1972) afirmou que as condições antecedentes de uso da terra, as queimadas, as construções de estradas e conversão de florestas em campos de pastagem, aumentaram a produção de sedimentos em bacias da Califórnia nos Estados Unidos, de fatores que variavam de 1,24 a mais de 4,0. A turbidez do escoamento superficial após as maiores cheias, dobrou, e o teor de silte e argila dos solos aumentou de 19 para 29%. A turbidez nos rios foi também fortemente influenciada por mudanças na erodibilidade dos solos e pela presença de cascalhos. As produções de sedimentos a partir de uma variedade reduzida de práticas de cultivo nas bacias agrícolas são consistentemente muito mais baixas que as produções verificadas nas áreas onde se utilizam as práticas convencionais de cultivo (uma sequência de araduras, gradeamentos, plantio e cultivo mecânico). Os estudos de Harrold (1972) em bacias com dois acres de milho com mínimo cultivo (aradura e plantio somente), mostraram que a produção de sedimentos para um período de 3 anos foi 0,4 ton/acre/ano comparado com 2,7 ton/acre/ano para áreas com plantações de milho convencionalmente cultivadas. As produções de sedimentos, para um período de 8 anos, a partir de áreas com dois acres de milho sem práticas de cultivo (usando-se somente o controle químico para ervas daninhas), estiveram em torno de 0,01 ton/acre/ano comparado com 1 ton/acre/ano para áreas convencionalmente cultivadas. Whitaker et al. (1972), examinaram que perdas de solo poderiam ser esperadas com diferentes tratamentos da terra. Uma comparação ao longo de 17 anos entre prática convencional de cultivo e cultivo sem aradura, mostrou que as perdas de solo, quando não se praticava a aradura, era metade das verificadas quando da utilização das práticas convencionais de cultivo; para os anos úmidos de 1969 e 1970, as perdas nos solos sem aradura foram somente um terço daquelas ocorridas nas áreas com cultivo convencional. O efeito do manejo do milho residual foi também verificado de várias maneiras: lotes de milho colhido para silagem mostraram maiores perdas de solo que nos lotes cujas colheitas destinavam-se somente à obtenção dos grãos; lotes de milho tratados com fertilizantes apenas no começo de cada ano, mostraram maiores perdas de solo que lotes com tratamentos similares

porém com aplicações periódicas de fertilizantes durante o ano todo, num período de 12 anos.

2.2. Modêlos de Previsão de Taxas de Erosão e Produção de Sedimentos

Indubitavelmente, os modêlos são instrumentos valiosos de previsão que possibilitam a estimativa da extensão da erosão em uma dada área problema, que por razões físicas ou econômicas, não dispõe de meios para a obtenção de registros através da medição. Uma das primeiras tentativas de se estabelecer uma relação que pudesse ser usada nos projetos de conservação de solo e água, capaz de prever as taxas de erosão a longo prazo para uma dada situação, foi apresentada por Zingg (1940), citado por Vanoni (1975). A partir de dados obtidos em parcelas experimentais com erosão laminar, Zingg (1940) relacionou grau e comprimento da declividade com perdas de solo. Ainda segundo Vanoni (1975), outros pesquisadores (Smith, 1941; Smith e Whitt, 1947; Van Doren e Bartelli, 1956), consideraram outros fatores, além dos analisados por Zingg (1940), tais como erodibilidade do solo e práticas de manejo do solo, no desenvolvimento de suas equações. Esses fatores foram mais adiante avaliados e consolidados, e um parâmetro de chuva foi adicionado para obter-se a famosa equação empírica de Musgrave (Musgrave, 1947). A partir de então, muitos modelos surgiram na literatura, variando entre modelos determinísticos do tipo caixa preta segundo Bennett (1974), tais como o modelo de Wischmeier e Smith (1965); a equação universal de perda de solo - (Agricultural Research Service, 1961; Wischmeier e Smith, 1958; Wischmeier, 1960); usada em combinação com razão de liberação de sedimentos (Vanoni, 1970; Williams e Berndt, 1972); equações baseadas nos parâmetros da bacia (Barnett e Rogers, 1966; Stocking, 1972; Flaxman, 1972; Jansen e Painter, 1974); ou no transporte de sedimentos versus curva de descarga - (Miller, 1951; Renard e Lane, 1972; Bennett e Sabol, 1973; Rendon-Herrero, 1974); modelos detalhados de erosão tais como os propostos por Meyer e Wischmeier (1969) e, Rowlison e Martin (1971), que consideram vários sub-processos do processo de erosão; modelos estocásticos de produção de sedimentos tais como os propostos por Murota e Hashino (1969); Woolhiser e Blinco (1972); Woolhiser e Todorovic (1974); Foster e Wischmeier (1974); modelos analíticos como os apresentados por Meyer (1965); Meyer et al. (1972); Foster e Meyer (1972 a, b, c), Li et al. (1973) e Komura (1976). A maioria das equações apresentadas até o momento, foram entretanto, derivadas empirica -

mente com base na análise de regressão convencional e incluem fatores para chuva, comprimento e grau da declividade, erodibilidade do solo, práticas de manejo e cultivo, etc. Essas equações têm como limitação principal, o uso da otimização numérica que obscurece importantes interações dificultando a compreensão do processo, e são somente válidas para os locais para os quais foram desenvolvidas. Além do mais, a variabilidade temporal das condições hidrológicas quando não tomada em conta, torna praticamente sem efeito as relações primariamente obtidas, restringindo ainda mais a aplicabilidade das equações cujo grande mérito é a resposta imediata de um problema urgente.

Modelos estocásticos de produção de sedimentos, tais como os propostos mais recentemente por Murota e Hashino (1969) e, Woolhiser e Todorovic (1974), fornecem inestimáveis informações quanto à variabilidade temporal do fenômeno de produção de sedimentos, no entanto, segundo Bennett (1974), atualmente tais modelos podem tão somente ser formulados analiticamente para pequenas áreas onde muitas das variáveis relativas à produção de sedimentos são uniformes. Mesmo os modelos essencialmente analíticos tais como os apresentados por Li et al (1973) e Komura (1976) restringem-se tão somente a pequenas áreas com a maioria das variáveis sendo controladas, não tendo sido até o momento apresentado um procedimento que possibilite a utilização destas equações na previsão das taxas de erosão nas bacias, onde as condições são amplamente variadas no tempo e no espaço.

2.2.1. A Equação Universal de Perda de Solo

Um dos objetivos centrais da pesquisa em erosão nos Estados Unidos, tem sido a equação universal de perda de solo (Agricultural Research Service, 1961; Wischmeier e Smith, 1958; Wischmeier, 1960), a qual representa o esforço de mais de duas décadas de trabalho realizado em diversas estações experimentais, em 37 estados dos Estados Unidos. Embora os estudos iniciais tivessem como meta prioritária demonstrar e avaliar os imensos danos da erosão, as pesquisas atuais visam (1) refinar e estender a aplicabilidade da equação com base na existência de novos dados; (2) avaliar a efetividade na erosão de cultivos alternativos e esquemas de manejo; e (3) procurar melhor compreensão dos mecanismos básicos que afetam a erosão. Atualmente, entretanto, segundo Elwell e Stocking (1975) além do fato de nenhum dos fatores da equação utilizar uma variável de referência que tenha orientação geográfica direta, o grande obstáculo quanto a utilização da equação fica

por conta do volume necessariamente grande e detalhado de informações requeridas para sua utilização, o que a torna indisponível por exemplo, para os países em desenvolvimento que fundamentalmente são os mais necessitados na avaliação dos desperdícios de seus recursos naturais.

Williams e Berndt (1972), estenderam a equação universal de perda de solo para uso em bacias, modificando os fatores de solo, topografia e manejo. Razões de liberação de sedimentos (a produção de sedimentos num dado ponto dividido pela área total fornecedora de sedimentos a montante do ponto considerado) foram calculadas usando-se valores medidos de produção de sedimentos a partir de 8 anos de registros em 5 bacias representativas. Estas razões relacionaram-se satisfatoriamente com as declividades médias dos canais principais das redes de drenagem das bacias consideradas. Com o conhecimento desta relação foi então possível usar a equação universal de perda de solo em combinação com razão de liberação de sedimentos, para estimar as produções de sedimentos em Texas Blackland, Estados Unidos. Uma outra modificação posterior nesta equação, pretendia torná-la aplicável na previsão das taxas de erosão a partir de um temporal. Williams (1972), substituiu o produto taxa de escoamento versus quantidade de escoamento pelo fator de energia da chuva. Este procedimento superou dois obstáculos importantes na aplicação da equação. Primeiro, mostrou não haver uma relação valiosamente isolada entre produção de sedimentos e o fator de energia da chuva, de modo que, para idênticas quantidades e intensidades de chuva, é possível obter-se taxas de escoamento e produções de sedimentos amplamente variados se as condições de umidade antecedente não forem idênticas. Segundo Williams e Berndt (1972), como Piest e Spomer (1968), a equação universal de perda de solo frequentemente superestima as produções de sedimentos para temporais com baixos fatores de energia da chuva, e subestima as produções para temporais com altos fatores de energia da chuva.

Os estudos mais recentes de modelos de produção de sedimentos, têm dado maior ênfase ao desenvolvimento de relações compreensíveis que considerem os mecanismos da erosão com mais detalhes. Meyer e Wischmeier (1969), sumarizaram dados de erosão em parcelas experimentais, taxas de erosão com simulador de chuva, e resultados de ensaios conduzidos em laboratórios, juntamente com algumas considerações teóricas, para postularem o desprendimento do solo e taxas de transporte, pela chuva e escoamento superficial.

Rowlison e Martin (1971) estabeleceram que muitas variáveis - declividade do terreno, tipo de solo, peso específico do solo, intensidade e

diâmetro das gotas de chuva, e profundidade da lâmina d'água retida superficialmente no solo durante o temporal - poderiam limitar as taxas de erosão do solo, criando tanto um limite de transporte como uma condição particular limite de desprendimento. Eles representaram o desprendimento potencial do solo e as taxas de transporte como efeitos superficiais que dependiam sobretudo da declividade do terreno e da profundidade da lâmina d'água retida superficialmente. Atualmente, contudo, tanto o modelo de Meyer e Wischmeier (1969) como o modelo de Rowlison e Martin (1971) são essencialmente conceituais.

Vários pesquisadores (Foster e Meyer, 1972 a, b, c; Meyer et al., 1972) têm similantemente definido condições teóricas limites de transporte e desprendimento, e têm sugerido expressões para calcular as taxas de desprendimento e transporte de solo. Outros pesquisadores têm procurado estabelecer metodologias com base nas características hidráulicas do fluxo superficial e princípios básicos de transporte de sedimentos, mediante o uso de procedimentos analíticos para estimar as taxas de erosão, como é o caso dos trabalhos apresentados por Li et al., (1973) e Komura (1976).

2.3. Mecanismos da Erosão

A erosão foi definida por Ellison (1947), como "um processo de desprendimento e transporte das partículas sólidas do solo pelos agentes erosivos". Os principais agentes dinâmicos externos de erosão são água, vento, gravidade e gelo. Embora cada um desses agentes possa ser importante localizadamente, somente os efeitos das forças hidrosféricas da chuva e do escoamento superficial serão considerados.

2.3.1. Fases da Erosão

A erosão superficial pela água em um solo exposto ou parcialmente exposto, tal como um solo recentemente trabalhado, ocorre em geral, em quatro fases ou estágios distintos (Bennett, 1974). Esses estágios tendem a se seguirem, no tempo de ocorrência para um dado ponto em uma dada extensão, e na progressão do declive do terreno, para um tempo particular.

O primeiro desses estágios é a Erosão por Embate, decorrente da energia de impacto das gotas de chuva de encontro ao solo, que além de desintegrarem parcialmente os agregados naturais, libertam as partículas fi-

nas projetando-as no ar. Este estágio da erosão apresenta maiores magnitudes no intervalo de tempo decorrido entre o início da precipitação e a formação do escoamento superficial, para uma dada localização, e, tende a diminuir seu efeito à proporção que aumenta a profundidade da lâmina d'água que escoou ou é retida superficialmente.

O segundo desses estágios é a Erosão em Lençol ou Laminar (Sheet erosion). Esta forma de erosão caracteriza-se pelo desgaste laminar causado pelas enxurradas que deslizam como um lençol, desgastando a superfície do solo suave e uniformemente em toda a sua extensão. A matéria orgânica e as partículas de argila são as primeiras porções do solo a se desprenderem (Bennett, 1955); são as partes mais ricas e onde se encontra as maiores quantidades de nutrientes, para as plantas.

É uma forma de erosão bastante difícil de ser observada, permanecendo às vezes por muitos e muitos anos à vista sem que se perceba sua terrível atuação. Sua ocorrência pode ser constatada pelo decréscimo de produção das culturas e também pelo aparecimento de raízes ou mesmo marcas no caule das plantas onde o solo tenha sido arrastado.

A desproteção dos terrenos varia largamente com suas susceptibilidades ao desgaste laminar, dependendo principalmente da declividade, clima e características do solo. As áreas com solos profundos e moderadamente profundos, bem como aquelas sujeitas a chuvas fortes e intensas, são provavelmente as mais difíceis. Onde os solos superficiais rasos repousam sobre subsolo argiloso denso ou outras camadas impenetráveis, o terreno é especialmente sujeito a esta forma de erosão. Solos de fina granulação (siltosos), solos arenosos frágeis, e todos os solos deficientes em matéria orgânica são também excepcionalmente vulneráveis (Bennett, 1955).

O terceiro estágio é a Erosão em Córregos (rill erosion) que consiste essencialmente no desenvolvimento de pequenos canais nos quais o fluxo superficial se concentra. Esses pequenos canais, que podem facilmente ser removidos pelas práticas agrícolas normais, se formam devido a variação quanto a resistência à erosão imposta pela área sob consideração, que em geral, se deve a pequenas mudanças na elevação e/ou declividade dos terrenos.

Esta forma de erosão é mais fácil de ser observada que a Erosão em Lençol, contudo, é também frequentemente negligenciada. Ordinariamente a Erosão em Córregos é considerada como um estágio mais avançado da Erosão Laminar. Pode-se dizer que nos solos maleáveis jovens, arados, especialmente

aqueles com alto teor de silte, onde as declividades são mais íngremes que cerca de 4 ou 5%, esse tipo de erosão é mais comum.

O estágio final do processo é a Erosão em Sulcos Profundos ou Ravinas (gully erosion), onde os fluxos provenientes de um grande número de córregos se concentram em aberturas ou sulcos naturais que ao passar dos anos transformam-se em verdadeiras ravinas, que se dirigem para outras de maiores profundidades.

Ordinariamente, os sulcos profundos (Gullies) carregam água durante ou imediatamente após as enxurradas. Em geral, não podem ser eliminados pelas atividades normais de cultivo, e a maioria torna-se no passar de tempo, intransponível pelas máquinas de tração motora ou animal (alguns constituem-se de imensas fendas, bastante profundas e suficientemente largas).

Há dois tipos principais de sulcos profundos; sulcos com lados em declive e fundo estreitado em forma de V e sulcos com lados mais ou menos verticais com fundo largo em forma de U; que geralmente são menos sinuosos que os tipos de fundo estreito. Os sulcos em forma de V são os que mais comumente ocorrem, exceto nos solos maleáveis cujo substrato pode facilmente ser cortado, onde os tipos em forma de U predominam.

A erosão em sulcos profundos caracteriza um estágio seriíssimo do processo de degradação do solo e geralmente reflete um uso exagerado e irracional do solo.

A ocorrência sucessiva no tempo desses quatro estágios da erosão não necessariamente se verifica para toda área ou extensão sob consideração, uma vez que tal ocorrência depende de vários fatores externos envolvidos no processo. Em cada um desses diferentes estágios de erosão, um modo diferente de remoção e transporte predomina, e idealmente, cada estágio deveria ser considerado separadamente em um modelo de produção de sedimentos.

2.3.2. Remoção e Transporte do Solo

Para uma dada área, a remoção e transporte das partículas sólidas do solo são efetuados por quatro diferentes sub-processos durante um tempo, que são: (1) desprendimento pelo impacto das gotas de chuva; (2) transporte pelo impacto das gotas de chuva; (3) desprendimento pelo escoamento superficial; e (4) transporte pelo escoamento superficial.

Em geral, estes quatro sub-processos dependem de três fatores, (a) a energia dos agentes erosivos (chuva e escoamento superficial); (b) a

erodibilidade do solo ou sua susceptibilidade à erosão; e (c) a influência da cobertura vegetal de proteção. O primeiro desses fatores reflete a potencialidade erosiva do processo, enquanto os dois últimos refletem a predisposição ou resistência imposta pelo solo através das suas condições físico-químicas, à energia potencial dos agentes erosivos.

2.3.2.1. Efeito das Gotas de Chuva

O processo de erosão hídrica se inicia com o desprendimento das partículas do solo pelo impacto das gotas de chuva. A desintegração dos agregados naturais do solo e o transporte das partículas efetuados nesta fase, estão diretamente relacionados com a energia da chuva em particular.

Na ausência de obstáculos, as gotas de chuva, golpeiam a superfície do solo com força considerável e se infiltram abaixo da superfície ou se acumulam sobre ela, dependendo do teor de umidade do solo. Cada gota atua, ao golpear o solo, como uma pequena bomba, projetando as partículas desse solo no ar e arrastando substâncias solúveis. Nos solos em nível, as partículas são distribuídas mais ou menos uniformemente em todas as direções, no entanto, nos solos declivosos, há uma taxa líquida de transporte declividade abaixo. O escoamento superficial no entanto, é o veículo que transporta essas partículas para fora dos limites de suas possíveis utilizações.

A energia cinética de uma gota isolada de chuva quando bate na superfície do solo, é igual ao semi-produto da sua massa pelo quadrado de sua velocidade. A velocidade de uma gota em queda, inicialmente aumenta, até que uma condição de equilíbrio entre o peso da gota e a resistência, imposta pelo ar, é estabelecida quando então, a gota adquire uma velocidade constante ou "velocidade terminal". Desde que a massa da gota é proporcional ao cubo de seu diâmetro e, sua velocidade terminal também aumenta com o diâmetro (ver tabela 2.1), a energia de uma gota isolada aumenta rapidamente à proporção que suas dimensões aumentam.

A limitada evidência disponível indica, segundo Linsley et al. , (1949), que o tamanho médio da gota aumenta apenas ligeiramente com a intensidade da chuva, para uma dada localidade. O efeito dessa variação entretanto, juntamente com a massa total da chuva acrescida, aumenta a potencia erosiva da chuva relativamente mais rápido que sua intensidade.

A energia de uma gota de chuva pode ser calculada de maneira dire

ta se seu tamanho e velocidade são conhecidos. Entretanto, o cálculo da energia total das gotas de chuva dentro de um temporal não é tão simples, mesmo que a massa total da chuva fosse conhecida. Tal dificuldade é ainda maior quando se pretende calcular a energia com a qual as gotas da chuva atingem, a superfície do solo. Nessas circunstâncias, alguma energia é dissipada antes da água atingir o solo, desde que algumas gotas são interceptadas pela vegetação, formações rochosas, resíduos vegetais e outros obstáculos, que são fatores altamente variados no tempo e no espaço. Em adição à variabili-

Tabela 2.1 - Velocidade Terminal das Gotas de Chuva

Diâmetro da Gota (mm)	Velocidade Terminal (m/s)	
	Segundo Lenard	Segundo Laws
0,5	3,51	-
1,0	4,39	-
1,5	5,70	5,52
2,0	5,92	6,59
3,0	6,89	8,05
4,0	7,72	8,88
5,0	7,99	9,24
5,5	7,99	9,30
6,0	7,90	9,30
6,5	7,81	-

(Fonte: Linsley, R.K., Kohler, M.A., e Paulhus, J.L., 1949)

dade desses fatores, uma comparação entre temporais idênticos deve considerar variações na direção e velocidade dos ventos. Por exemplo, a quantidade de chuva interceptada por culturas em fileiras é muito maior quando o vento sopra transversalmente às fileiras que quando sopra paralelo a elas. Também, uma alta cobertura vegetal livre, interceptará muito menos chuva quando as gotas estiverem caindo verticalmente do que quando um vento propulsor forçar a chuva a cair num ângulo menor. Se a cobertura vegetal for extremamente densa, as variações no vento, tamanho das gotas e velocidade terminal serão insignificantes - a energia será essencialmente dissipada antes que a água atinja o solo.

Wischmeier e Smith (1958), baseados em dados da distribuição dos

tamanhos e velocidades terminais das gotas, fizeram o cálculo da energia cinética para diferentes intensidades de chuva, obtendo uma equação de regressão que dá os valores da energia em função da intensidade da chuva. As figuras (2.1) e (2.2) mostram a distribuição das gotas em uma chuva natural, e, as velocidades terminais dessas gotas no ar, respectivamente.

Muitos estudos têm se desenvolvido procurando relacionar perda de solo com as características da chuva. Hudson (1971), por exemplo, definiu a erosividade da chuva como sendo sua habilidade potencial para causar erosão, sendo função das características físicas da chuva tais como duração, quantidade, distribuição, intensidade, etc. Entre as características citadas, a intensidade segundo Hudson (1971), é particularmente importante como um parâmetro potencial de erosividade.

Arend e Horton (1942), concluíram que as chuvas com altas intensidades produzem, em geral, enxurradas suficientes para gerar erosão laminar após superarem a capacidade de infiltração do solo. Rose (1960), trabalhando com intensidades de 50,8; 101,6; e 152,4 mm/h, concluiu que a desagregação do solo depende mais do tempo de duração da chuva que da sua intensidade. Outros pesquisadores (Bertrand e Sor, 1962; Mazurak e Mosher, 1968; Moldenhaver e Long, 1964; Wischmeier e Smith, 1958) entretanto, mostram que há uma relação direta entre a perda de solo e a intensidade da chuva.

Os resultados sumarizados por Wischmeier e Smith (1958), obtidos através de 8250 parcelas anuais, em 60 estações experimentais nos Estados Unidos, mostraram que a correlação de perda de solo com a quantidade de chuvas individuais foi baixa, o mesmo ocorrendo em relação à quantidade de chuva caída em 5,15 e 30 minutos. O fator que mais se correlacionou com a erosão foi a energia cinética, entretanto, houve considerável variação, não explicada. Várias regressões múltiplas foram testadas e o melhor estimador encontrado para a previsão das perdas de solo em parcelas experimentais, foi o produto da energia cinética da chuva pela sua intensidade máxima em 30 minutos, representado por EI_{30} .

De certo modo, mesmo considerando a grande quantidade de estudos realizados, a avaliação quantitativa do processo de remoção e transporte de materiais pelas gotas durante um temporal, permanece ainda insatisfatória e um tanto obscura em função das dificuldades encontradas em quantificar as complexas interações envolvidas, o que tem forçado os pesquisadores a recorrerem a condições controladas de ensaio e daí estabelecerem relações com base na análise de regressão convencional e/ou, procedimentos analíticos que

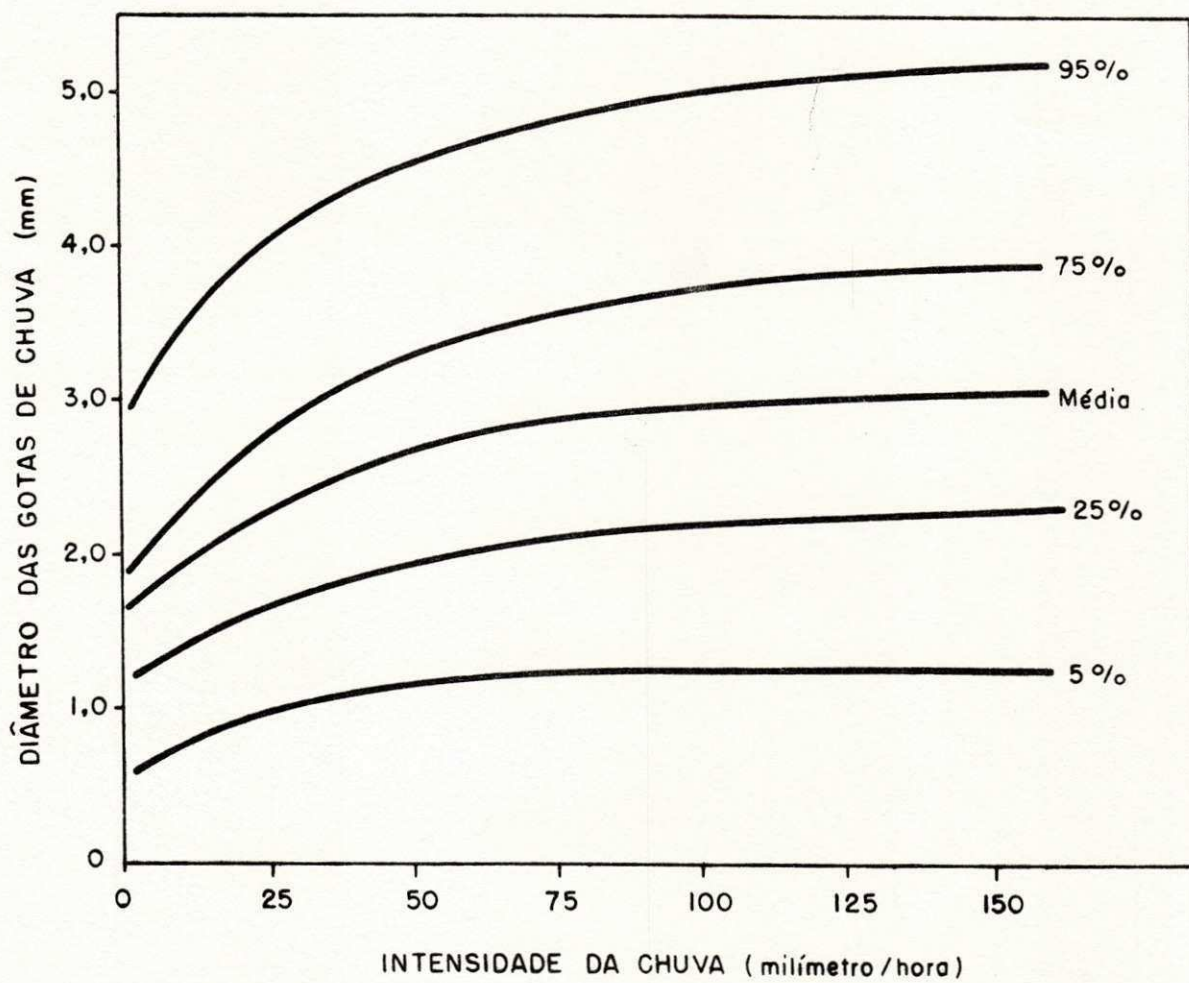


Fig. 2.1 - Distribuição das Gotas em uma Chuva Natural
(Fonte: Wischmeier, W.H., e Smith, D.D., 1958).

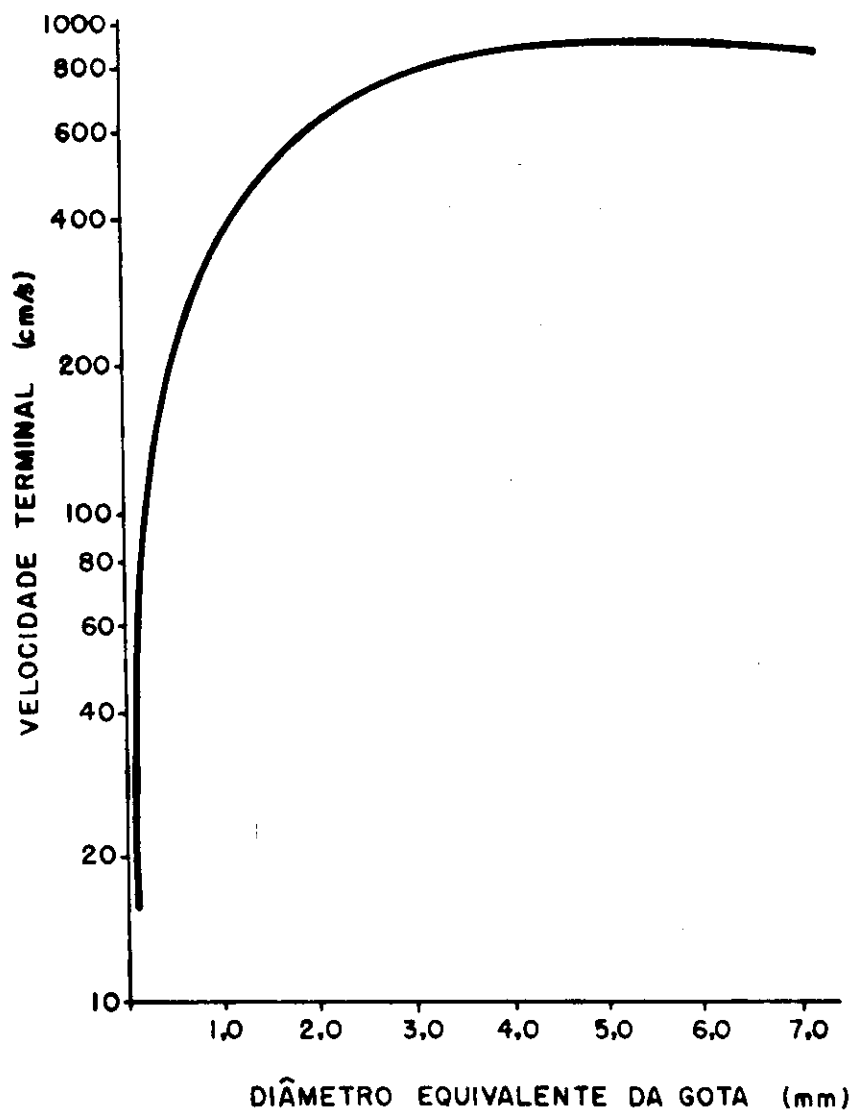


Fig. 2.2. - Velocidades Terminais de Gotas de Chuva de Diferentes Diâmetros no Ar.

(Fonte: Wischmeier, W.H., e Smith, D.D., 1958).

envolvem a inclusão de muitos coeficientes de valores duvidosos

2.3.2.2. Efeito do Escoamento Superficial

As partículas do solo desprendidas pelo impacto das gotas de chuva têm no escoamento superficial o principal veículo de transporte, capaz de levar os produtos da erosão a grandes distâncias de suas fontes de origem. Além disso, o fluxo superficial pode possuir energia suficiente para quebrar os agregados naturais do solo e produzir erosão. A potência erosiva do escoamento superficial aumenta principalmente com a turbulência do movimento do fluido.

O escoamento superficial tem origem, fundamentalmente nas precipitações. Parte da água das chuvas é interceptada pela vegetação e outros obstáculos, de onde se evapora posteriormente. Do volume que atinge a superfície do solo, parte é retido em depressões do terreno, parte se infiltra e o restante escoar pela superfície logo que a intensidade da precipitação supera a capacidade de infiltração no solo e os espaços nas superfícies retentoras tenham sido preenchidos.

Prescindindo a água evaporada, o estado de permeabilidade e a condição de umidade do solo, regulam em todo momento, a repartição entre a água que se infiltra e a que escoar ou é retida superficialmente nos terrenos. A formação do escoamento superficial portanto, dependerá, do regime das precipitações e das características hidrológicas do solo.

A ação do escoamento superficial no processo erosivo se manifesta em duplo aspecto: desagrega as partículas do solo e, ao mesmo tempo, transporta essas partículas para outros lugares. A ocorrência desse duplo aspecto, logicamente, está condicionada a uma série de fatores relativos às características do escoamento; tamanho e forma das partículas sólidas susceptíveis ao transporte; declividade dos terrenos; condições e natureza da cobertura vegetal, etc.

No início do escoamento superficial, forma-se uma película laminar que aumenta de espessura, à medida que a precipitação prossegue, até atingir um estado de equilíbrio a proporção que a lâmina d'água aumenta de espessura, dependendo de determinadas condições de solo, clima e intensidade da chuva, o fluxo superficial torna-se turbulento. As rugosidades ou asperezas da superfície do terreno causam pequenas ondulações no fluxo, que ao atingir certa velocidade, dão lugar à formação de turbulências que ten-

dem a aumentar com a concentração do fluxo ao longo das declividades. Essa turbulência desenvolve forças ascensoriais no fluxo, pondo em suspensão as partículas do solo. As partículas mais leves e mais finas permanecem em suspensão e são assim transportadas pelo fluxo. As partículas menos leves permanecem por algum tempo em suspensão, enquanto as forças ascensoriais as mantiverem assim, e se depositam quando estas forças diminuem, permanecendo algum tempo na superfície do solo, sendo transportadas por arrasto, até que novos movimentos turbulentos do fluxo as ponha novamente em suspensão. Este tipo de transporte é conhecido como saltação. Por último, as partículas mais grossas e mais pesadas permanecem na superfície, deslizando ou rolando sobre o solo sob o efeito da força trativa exercida pelo fluxo.

2.3.3. Fatores Intervenientes no Processo de Erosão

A extensão da erosão e conseqüentemente a quantidade de sedimentos produzidos em uma bacia, depende sobretudo das propriedades do solo, clima, vegetação, topografia e outras condições.

A cobertura vegetal influencia as taxas de escoamento superficial e erosão mais que qualquer outro fator físico individual. O grau e comprimento das declividades dos terrenos também exercem efeitos importantes.

A intensidade da chuva, o tipo de solo e sua condição quanto ao conteúdo de umidade presente e sua permeabilidade, são também fatores contribuintes da maior importância.

As chuvas intensas causam muito mais danos que as chuvas moderadas. O solo por sua vez, em função de sua ampla variabilidade espacial, introduz uma grande variedade de condições que apreciavelmente ou profundamente, influenciam as taxas de infiltração e portanto, as taxas de escoamento superficial e de erosão. Os solos ditos arenosos (com textura grossa ou grosseira) sofrem mais a ação das águas, uma vez que não são bem estruturados. Formam-se grandes enxurradas, e este tipo de solo possui pequena resistência à força de arrasto. Por outro lado, nos solos argilosos (textura fina), já ocorre o inverso, a infiltração é menor que nos solos arenosos, acarretando grandes volumes de enxurradas, porém, com menor arrastamento de terra, pois este tipo de solo possui, em geral, maior coesão entre as partículas. Ademais, a capacidade de infiltração varia de acordo com a profundidade das camadas impermeáveis do sub-solo.

A erodibilidade dos solos ou sua susceptibilidade à erosão, depen

de de muitos fatores, a maioria dos quais são altamente interrelacionados. Alguns dos fatores mais importantes que influenciam a resistência do solo à erosão são: (1) estrutura; (2) estratificação; (3) permeabilidade; (4) teor de umidade; (5) textura; (6) composição mecânica; (7) tipo e extensão da cobertura vegetal; e (8) declividade do terreno.

Embora a erodibilidade de um tipo particular de solo, varia inver^samente com o tamanho de suas partículas constituintes, solos arenosos fiⁿos erodem muito mais prontamente que cementados hardpan ou argilas duras.

Desde que a coesão é reduzida pela deficiência de umidade, os solos são geralmente mais erosivos quando secos que quando úmidos.

Um solo com uma camada superior incrustada é muito menos susceptí^vel à erosão que o mesmo solo imediatamente após as operações convencionais de cultivo.

A presença do material coloidal, especialmente aquele de origem vegetal, tende a aumentar a coesão das partículas do solo e assim diminuir sua erosividade. Em adição ao fato que a vegetação dissipa grande parte da energia de colisão das gotas de chuva, ela também tende a aumentar a resistência do solo à erosão. As partículas finas aderem ao sistema radicular - próximo à superfície do solo e atuam como uma "armadura" do solo. Além disso, uma cobertura densa, tal como grama, limita a velocidade do fluxo e ao mesmo tempo atua como um tapete protetor cobrindo o solo subjacente. Afóra esta imensa gama de variáveis condicionantes, as atividades humanas introduzem outras numerosas condições e fatores, que afetam sensivelmente o proces^so erosivo.

Em geral, estas condições resultam das modificações impostas pelas atividades humanas que perturbam as condições iniciais de equilíbrio, criando novas condições que afetam de maneira diversa o processo de erosão. Algumas dessas atividades tais como o distúrbio da cobertura vegetal nos terrenos cultivados; escavações para construções civis; rodovias, limpeza de usinas, e outras atividades, podem causar sérias perturbações nas condições naturais e estabelecerem importantes fontes de erosão. Algumas ativida^des industriais podem contribuir indiretamente, como é o caso das usinas de fusão de cobre, que podem produzir gases tóxicos à vegetação, resultando na sua devastação e estabelecendo condições favoráveis de violenta erosão.

A intervenção do homem na natureza, contudo, é um aspecto determiⁿante da sua própria existência, e como tal, representa num contexto global, um processo natural. No entanto, é preciso que o homem não se deixe dominar

por preconceitos egoísticos e seja capaz de compreender que esta intervenção vista às vezes como um processo natural, pode tornar-se o princípio do fim. É preciso portanto, que o homem, soberano sobre a Terra, saiba harmonizar seus interesses com os do meio em que vive, ou, em caso contrário, estará buscando o próprio fim. Por mais que a força do desenvolvimento exija, o homem dispõe de meios para a adoção de medidas racionais de utilização da terra, que possibilitem e preservem de certo modo sua integridade, minimizando as influências negativas da quebra irracional do equilíbrio natural.

2.3.4. Efeitos Gerais da Erosão

A terra produtiva está sujeita a muitos males o pior dos quais decorre da erosão do solo. Os efeitos da erosão variam amplamente no tempo e no espaço, dependendo do tipo de solo, como ele é usado, do clima e muitos outros fatores. Infelizmente, o homem tem se mostrado indolente quanto à avaliação dos efeitos da erosão acelerada, mesmo após reconhecer a existência de sua extensão. Além de produzir sedimentos que por si só, via de regra são prejudiciais, a erosão pode causar sérios danos locais às terras agrícolas, seja pela redução da fertilidade e produtividade dos solos através da remoção de camadas férteis, seja pelo aparecimento de valas profundas sulcadas no solo tornando-o intransitável para as máquinas e implementos agrícolas convencionais. Nos estágios mais avançados, a erosão modifica os terrenos de tal forma que o cultivo agrícola torna-se bastante dispendioso ou até mesmo impossível.

Além dos problemas relativos ao desgaste do solo agrícola, os produtos da erosão podem também causar sérios problemas às estruturas hidráulicas e outras obras de engenharia o que requer do engenheiro projetista, certo grau de conhecimento relativo à natureza dos processos de erosão-transporte-deposição, de modo a torná-lo capaz de prognosticar os efeitos provenientes das mudanças que possam ocorrer bem como, estabelecer medidas adequadas de proteção. A construção de uma barragem em um curso d'água, por exemplo, muda as características hidráulicas do fluxo e portanto, sua capacidade de transporte, o que poderá causar sérios problemas tanto a montante como a jusante do reservatório. A deposição nas embocaduras dos reservatórios, pode causar sérias agradações as quais resultam na redução da capacidade de condução dos cursos d'água alimentadores, criando transbordamentos mais frequentes e permanentes a montante do reservatório; elevação do len-

çol freático e alagamento das terras nos vales, soterramento de benfeitorias e outros efeitos danosos. Por outro lado, a mudança nas características hidráulicas do fluxo a jusante do reservatório, estabelece um novo conjunto de condições para as quais o canal abaixo da barragem tenderá se ajustar para estabelecer o equilíbrio. Onde o fluxo de saída tiver força tratativa suficiente para iniciar o movimento de materiais, a degradação tomará lugar imediatamente. O abaixamento do canal principal a jusante do reservatório, resultará na degradação correlata dos canais tributários. Esta degradação poderá iniciar um novo ciclo de erosão nas bacias tributárias. Nos casos mais severos, poderá ocorrer abaixamento do lençol freático, com resultados danosos para a agricultura; solapamento de pilares de pontes, etc. A deposição de sedimentos nos canais de irrigação e drenagem, nos canais de navegação, nos reservatórios naturais e artificiais, nos portos, nas ruas e rodovias, e nas edificações em geral, não somente cria sérios transtornos de ordem técnica, como também afeta consideravelmente as comunidades, ocasionando sérias dificuldades econômicas e sociais. Os efeitos da erosão são portanto, variados e extensivos, diretos e indiretos, e cujos danos dependem em geral da quantidade e natureza dos processos de erosão-transporte-deposição.

2.4. Considerações Finais

Embora a literatura apresente um número relativamente grande de modelos destinados à previsão das taxas de erosão nas declividades, poucos modelos foram desenvolvidos com base nas relações físicas do processo de erosão, sendo a grande maioria, constituída de modelos do tipo caixa-preta que além de obscurecerem relações importantes, limitam-se basicamente aos locais para os quais foram desenvolvidos. A análise física do fenômeno, embora complexa, parece ser o meio mais eficiente de se buscar eventuais soluções para os problemas práticos. Os modelos analíticos tendem a evoluir por etapas, apresentando-se bem simples no início com maior número de hipóteses, evoluindo gradativamente até que possam representar satisfatoriamente as condições de campo.

O presente trabalho pretende desenvolver um modelo desta natureza, contribuindo essencialmente no estabelecimento de uma metodologia que possibilite uma análise determinística do processo de erosão.

CAPÍTULO III

DEFINIÇÕES E SUPOSIÇÕES BÁSICAS

3.1. Definições

A erosão é comumente diferenciada de acordo com o agente erosivo (vento, água, gelo, gravidade, etc.) tipo ou origem (erosão por embate, erosão laminar, erosão em córregos, erosão em sulcos profundos ou ravinas, etc.) e natureza (geológica e acelerada). Estes termos, em geral, são bastante claros e já foram discutidos anteriormente neste trabalho (Capítulo II). Outras definições são apresentadas a seguir.

3.1.1. Erosão Geológica ou Normal

É definida como a erosão que normalmente ocorre na superfície terrestre sob condições naturais ou não perturbadas. Inclui os processos de desagregação e remoção de materiais pelo vento, água, gelo e gravidade.

3.1.2. Erosão Acelerada

É definida como o aumento da taxa de erosão sobre a erosão geológica ou normal, em decorrência da quebra de equilíbrio no meio ambiente pelas atividades humanas, principalmente as advindas das alterações conduzidas na cobertura vegetal tais como uso excessivo de pastagens, retirada de madeira por derrubada ou queima, práticas inadequadas de cultivo, etc. O processo de erosão torna-se grandemente acelerado e as produções de sedimen

to aumentam assustadoramente.

3.1.3. Erosão Bruta

Refere-se à quantidade total de material desprendido e removido pela ação dos agentes erosivos, numa determinada área num dado tempo.

3.1.4. Taxa de Erosão

É a taxa para a qual o solo é erodido a partir de uma dada área - (Vanoni, 1975). É usualmente expressa em unidades de volume ou peso do material erodido por unidade de área e por unidade de tempo.

3.1.5. Sedimento

É o produto da erosão. O termo se aplica geralmente ao material erodido que foi transportado e depositado pela água, mas algumas vezes, é também usado para denotar o material depositado pelo vento, gelo e outros agentes.

3.1.6. Produção de Sedimentos

É a quantidade total de sedimentos que sai de uma dada bacia ou área de drenagem num dado período de tempo, podendo ser medida em uma seção transversal de referência.

3.2. Suposições Básicas

As equações teóricas de previsão de taxas de erosão apresentadas neste desenvolvimento, têm como base as seguintes proposições principais:

(a) O escoamento superficial é unidimensional. As equações para duas ou três dimensões poderiam ser apresentadas, entretanto, segundo Liggett e Woolhiser (1967), os procedimentos envolvidos nas suas soluções numéricas são tão complexos que, segundo Bennett (1974), em face das atuais incertezas quanto a física do fluxo bi e tridimensional, tais esforços provavelmente não se justificariam;

(b) A distribuição de pressão no fluxo é hidrostática;

(c) O coeficiente de momentum na direção do fluxo é constante;

(d) A declividade da superfície do terreno sob consideração é uniforme;

(e) A composição da camada superficial do terreno sob considera - ção é relativamente homogênea;

(f) A carga de sedimentos presente no fluxo reflete satisfatoria - mente a extensão da erosão ao longo da declividade sob consideração. Como discutido anteriormente, o processo de erosão envolve quatro sub-processos: dois relacionados ao desprendimento das partículas do solo (pela chuva inicialmente e depois pelo fluxo, no transcorrer do temporal) e, dois relacio - nados ao transporte dessas partículas (pela chuva de início, e depois pelo fluxo).

Os processos de desprendimento refletem a interação entre a ener - gia dos agentes erosivos (chuva-fluxo), e as forças de coesão das partícu - las do solo. O produto dessa interação bastante complexa e amplamente varia da no tempo e no espaço, resulta prontamente no grau de disponibilidade ou quantidade de material susceptível ao transporte. Outras condições permane - cendo constantes, os processos de desprendimento e transporte pelas gotas de chuva, tendem a diminuir no decorrer do temporal, à proporção que a lâmi - na d'água sobre a superfície do terreno, aumenta de espessura. No entanto , a capacidade de desprendimento da chuva é consideravelmente superior à capa - cidade de desprendimento do fluxo, dado a maior potência erosiva da chuva , que segundo Hudson (1971), é cêrca de 256 vezes maior que a do escoamento. - Por outro lado, a capacidade de transporte da chuva (que tende a ocorrer no período de tempo entre o início da precipitação e a formação do deflúvio su - perficial), é relativamente insignificante, quando comparada à capacidade de transporte do escoamento superficial, que é o agente capaz de conduziros produtos da erosão a distâncias além dos limites possíveis de suas utiliza - ções. Portanto, na ausência de escoamento superficial, os efeitos erosivos são consideravelmente desprezíveis. Quando a intensidade da chuva é insufi - ciente para produzir escoamento superficial, é de se esperar que a ação ero - siva de tal chuva seja consideravelmente baixa em decorrência da sua baixa capacidade de desprendimento, que segundo Meyer (1971), é proporcional ao quadrado da intensidade da chuva, ou, em decorrência da cobertura vegetal que amortiza os efeitos erosivos da chuva.

(g) As equações de transporte de sedimentos utilizadas, represen - tam satisfatoriamente a capacidade de transporte do fluxo superficial.

(h) A carga de sedimentos presente no fluxo está sempre para sua capacidade de transporte. Tal suposição baseia-se na hipótese que o solo sobre o qual o fluxo ocorre é comparativamente solto, ou seja, que as partículas desse solo se encontram prontamente disponíveis para transporte. Para superar os erros decorrentes desta suposição, necessária ao desenvolvimento das equações teóricas, coeficientes de erodibilidade do solo são introduzidos nas equações finais de cálculo.

(i) A intensidade da chuva e a taxa de infiltração são constantes ao longo da declividade sobre a qual ocorre o deflúvio superficial sob consideração. Tal suposição é mais uma limitação imposta pelo desenvolvimento analítico das equações teóricas.

CAPÍTULO IV

DERIVAÇÃO DAS EQUAÇÕES GERAIS DE EROÇÃO

4.1. A Equação da Continuidade

A equação básica que governa a maioria dos modelos de erosão do solo, é a equação da continuidade do transporte de massa (Bennett, 1974). Segundo Li et al (1973), essa equação pode ser expressa como:

$$\frac{dq_s}{dx} = P_s \quad (4.1)$$

onde q_s é a taxa de transporte de sedimentos, incluindo a carga em suspensão, em volume do material por unidade de largura e por unidade de tempo (L^2T^{-1}). x é a distância positiva tomada na direção do fluxo ao longo da declividade considerada (L); e P_s é a taxa de captura de sedimentos finos pelo fluxo, em volume por unidade de área por unidade de tempo (LT^{-1}).

Por outro lado, a taxa de captura de sedimentos pelo fluxo, como usado por Foster e Meyer (1972b) pode ser tomada como função das taxas de desprendimento pela chuva (D_c) e fluxo superficial (D_f) respectivamente, tal que:

$$P_s = D_c + D_f \quad (4.2)$$

Como já discutido, as gotas de chuva participam ativamente no processo de desprendimento do solo, quebrando os agregados naturais e tornando-

as partículas constituinte da superfície do solo susceptíveis ao transporte, porém, a capacidade de transporte das gotículas é geralmente limitada. Com a suposição que a camada superficial do solo é relativamente solta, e portanto, disponível para transporte; a erosão por embate das gotículas de chuva é eliminada nesta análise teórica. Contudo, o efeito do impacto das gotas no fluxo superficial, será indiretamente tomado em conta no desenvolvimento posterior.

Um número bastante grande de fórmulas para calcular a taxa de transporte de sedimentos nos cursos d'água, tem sido apresentado por vários pesquisadores desde que Duboys (Vanoni, 1975) apresentou sua relação de força trativa. A dificuldade é selecionar conscientemente uma ou mais dessas fórmulas para a solução de um dado problema. Tal fato decorre desta seleção não ser direta desde que os resultados apresentados pelas diferentes fórmulas diferem frequentemente de modo drástico, sendo praticamente impossível determinar positivamente qual delas fornece resultados mais realísticos com a situação do problema particular.

Entre as muitas fórmulas disponíveis, as fórmulas de Shields, Kalinske-Brown e Einstein-Brown (Vanoni, 1975), foram selecionados porque são bastante usados nos cálculos de transporte de sedimentos e, também, porque tais fórmulas mostram um grau de simplicidade para serem adotadas. Assim, para efeito de análise, serão utilizadas as fórmulas propostas considerando que elas representam satisfatoriamente a equação de movimento do sedimento transportado pelo fluxo superficial.

4.2. Derivação da Equação Geral de Erosão com Base na Fórmula de Shields

A fórmula de Shields (1936) (Vanoni, 1975), baseia-se principalmente em dados obtidos experimentalmente em duas calhas de 40 cm e 80 cm de largura, respectivamente, com cinco tipos de sedimentos cujas densidades variavam entre 1,06 a 4,20. Usou-se como sedimento mais leve partículas de âmbar com diâmetro médio de 1,56 mm. Os demais sedimentos tinham diâmetro médio entre 1,70 mm e 2,50 mm. Devido as grandes dimensões dos sedimentos usados no experimento e a baixa tensão de cisalhamento, todo movimento das partículas se deu essencialmente como carga do leito. A fórmula de Shields pode ser escrita como:

$$g_s = 10qS_o \frac{(\tau_o - \tau_c)}{(S_s - 1)^2 d_s} \quad (4.3)$$

onde g_s é a descarga de sedimentos em peso por unidade de tempo por unidade de largura (kg/m/s); q é a taxa de fluxo em volume por unidade de tempo por unidade de largura (m^2/s); S_o é o gradiente de declividade; τ_o é a tensão de cisalhamento exercida pelo fluxo (kg/m^2); τ_c é a tensão crítica de cisalhamento para a qual o transporte das partículas se inicia (kg/m^2); S_s é a densidade média do sedimento; e d_s é o diâmetro médio (d_{50}) das partículas (em metros). Desde que a equação (4.3) é dimensionalmente homogênea, as quantidades podem ser expressas em qualquer sistema consistente de unidades.

Li et al. (1973), obtiveram experimentalmente uma expressão para a tensão de cisalhamento, τ_o , para fluxo turbulento ($2000 < R_e < 12.600$), sendo expressa como:

$$\tau_o = \gamma \left[\frac{(k + 0,012)q^{7/4} \nu^{1/4}}{8g} \right]^{1/3} S_o^{2/3} \quad (4.4)$$

onde, R_e é o número de Reynolds o qual é definido como Vy/ν , sendo V a velocidade média do escoamento (m/s); y é a profundidade real do fluxo (m); ν é a viscosidade cinemática da água (m/s); γ é o peso específico da água (kg/m^3); k é uma constante relativa ao fator de atrito de Darcy-Weisbach; e g é a aceleração da gravidade (m/s^2). As demais quantidades já foram definidas.

Li et al. (1973) e Shen e Li (1973), obtiveram o valor 0,25 para k a partir de ensaios conduzidos para fluxo sobre superfícies lisas. Komura (1976), cita com base na avaliação de fatores, de atrito em canais com superfícies rugosas, que o valor 0,60 pode ser admitido para fluxo sobre superfícies rugosas, no entanto, ressalta a necessidade de outros trabalhos experimentais para uma melhor avaliação desta constante.

Li et al. (1973) também obtiveram uma expressão para τ_o , na faixa de fluxo laminar $R_e < 900$, no entanto, como as equações de transporte de sedimentos usadas aqui são válidas tão somente para fluxo turbulento, e desde que, para fluxo laminar não se encontra equação de transporte comprovada na literatura especializada até o momento (Komura, 1976) e, o fluxo laminar não sendo comum, a análise do processo de erosão pelo fluxo laminar deixa de ser aqui considerado. Por outro lado, Yoon e Wenzel (1971) verificaram com base em medições de intensidade de turbulência que o escoamento superficial quando perturbado pela chuva, torna-se turbulento, mesmo na faixa laminar convencional do número de Reynolds. Assim, as equações derivadas para fluxo turbulento devem ser aplicadas na prática sem maiores perdas de precisão.

Desde que a equação (4.4) é uma representação da expressão: $\tau_o = \gamma S_o$, e uma vez que $\tau_c = \gamma S_c$ (Raudkivi, 1967), uma expressão semelhante a

(4.4) pode ser obtida para τ_c , ou seja:

$$\tau_c = \gamma \left[\frac{(k + 0,012)q^{7/4} v^{1/4}}{8g} \right]^{1/3} S_c^{2/3} \quad (4.5)$$

onde, S_c é a declividade crítica da superfície livre do escoamento superficial, para a qual a erosão torna-se apreciável (Meyer e Monke, 1965).

Substituindo as equações (4.4) e (4.5) na equação (4.3) e expressando o diâmetro médio em milímetros, obtêm-se:

$$g_s = \frac{\gamma q S_o \times 10^4}{(S_s - 1)^2 d_s} \left[\frac{(k + 0,012)q^{7/4} v^{1/4}}{8g} \right]^{1/3} (S_o^{2/3} - S_c^{2/3}) \quad (4.6)$$

ou,

$$g_s = \frac{\gamma \times 10^4 \left[(k + 0,012) v^{1/4} / 8g \right]^{1/3} S_o (S_o^{2/3} - S_c^{2/3}) q^{19/12}}{(S_s - 1)^2 d_s} \quad (4.7)$$

Shields (Raudkivi, 1967) expressou a tensão de cisalhamento crítica, τ_c , como:

$$\tau_c = 5,6 \times 10^{-5} \gamma (S_s - 1) d_s \quad (4.8)$$

com γ em quilograma por metro cúbico, τ_c em quilogramas por metro quadrado e, d_s em milímetros. Igualando as equações (4.5) e (4.8) obtêm-se uma equação para S_c :

$$S_c = \left\{ \frac{5,6 \times 10^{-5} (S_s - 1) d_s}{\left[(k + 0,012) v^{0,25} / 8g \right]^{1/3} q^{7/12}} \right\}^{3/2} \quad (4.9)$$

A equação de continuidade para o escoamento é:

$$q = q_o + q_* x \quad (4.10)$$

onde, q_o é a taxa de fluxo básico por unidade de largura (no escoamento superficial, q_o representa a taxa de entrada de fluxo por unidade de largura na extremidade superior da declividade) q_* é a taxa líquida de entrada lateral de fluxo por unidade de área, tal que $dq/dx = q_*$ (no escoamento superficial, q_* representa a taxa de entrada de fluxo a partir da chuva por unidade de área da declividade).

Substituindo a equação (4.10) na equação (4.9) e admitindo $q_o = 0$,

(isto ocorre, por exemplo, no caso em que a extremidade superior da declividade coincide com o divisor topográfico); $S_s = 2,65$; $k = 0,60$; $v = 8,5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ e $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ obtêm-se:

$$S_c = \frac{5,75 \times 10^{-5} (d_s)^{1,5}}{(q_* x)^{0,875}} \quad (4.11)$$

A equação (4.11) permite calcular a declividade crítica do fluxo sobre o terreno, em função do diâmetro médio (em milímetros); da taxa de chuva que se transforma em escoamento superficial, (em $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$); e do comprimento do declive considerado (em metros). Quando a declividade S_o , do terreno é menor que a declividade crítica do fluxo, S_c , a taxa de erosão, E , é zero. Ou seja, $E = 0$, quando $S_o < S_c$. Para $S_o > S_c$, a erosão aumenta com o grau do declive do terreno. Assim, para um dado declive, conhecendo-se d_s , x e S_o , pode-se determinar as características da chuva (frequência - intensidade - duração) capaz de causar erosão naquela declividade.

Substituindo a equação (4.9) na equação (4.7):

$$g_s = \left\{ \frac{\gamma \times 10^4 (k + 0,012) v^{1/4} / 8g^{1/3} S_o^{5/3} (q)^{19/12}}{(S_s - 1)^2 d_s} - \frac{0,56 \gamma S_o (q)}{(S_s - 1)} \right\} \quad (4.12)$$

Substituindo a equação (4.10) na equação (4.12) e derivando com relação a x :

$$\frac{dg_s}{dx} = \left\{ \frac{1,9 \times 10^5 \gamma [(k + 0,012) v^{0,25} / 8g]^{1/3} S_o^{5/3} q_* (q_c + q_* x)^{7/12}}{12 (S_s - 1)^2 d_s} - \frac{0,56 \gamma S_o q_*}{(S_s - 1)} \right\} = \gamma_s P_s \quad (4.13)$$

A taxa de erosão na declividade em peso por unidade de tempo por unidade de área é:

$$E_s = \frac{1}{L} g_s(L) = \frac{1}{L} \int_0^L \gamma_s P_s dx \quad (4.14)$$

onde, $g_s(L)$ indica g_s sendo a função de L .

Substituindo a equação (4.13) na equação (4.14) para $\gamma_S P_S dx$ obtém-se:

$$E_S = \left\{ \frac{1,9 \times 10^5 \gamma [(k + 0,012) \nu^{0,25}/8g]^{1/3} S_o^{5/3}}{12 L (S_S - 1)^2 d_S} q_* \int_0^L (q_o + q_*x)^{7/12} dx - \frac{0,56 \gamma S_o q_*}{L (S_S - 1)} \int_0^L dx \right\} \quad (4.15)$$

Integrando a equação (4.15)

$$E_S = \left\{ \frac{\gamma \times 10^4 [(k + 0,012) \nu^{0,25}/8g]^{1/3} S_o^{5/3}}{L (S_S - 1)^2 d_S} \left[(q_o + q_*L)^{19/12} - (q_o)^{19/12} \right] - \frac{0,56 \gamma S_o q_*}{(S_S - 1)} \right\} \quad (4.16)$$

Quando $q_o = 0$, a equação (4.16) pode ser expressa como:

$$E_S = \frac{C_1 S_o^{5/3} (q_*L)^{19/12}}{L \cdot d_S} - C_2 S_o q_* \quad (4.17)$$

onde:

$$C_1 = \frac{\gamma \times 10^4 [(k + 0,012) \nu^{0,25}/8g]^{1/3}}{(S_S - 1)^2} \quad (4.18)$$

e

$$C_2 = \frac{0,56 \gamma}{(S_S - 1)} \quad (4.19)$$

Substituindo os valores $\gamma = 10^3 \text{ kg}_f/\text{m}^3$; $k = 0,60$; $\nu = 8,5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$; $g = 9,8 \text{ m/s}^2$; $S_S = 2,65$; e introduzindo um fator de cobertura, C_V , e um coe-

ficiente de erodibilidade, C_e , na equação (4.17), e taxa de erosão, E_s , em quilogramas por segundo por metro quadrado, pode ser expressa como:

$$E_s = C_v \cdot C_e \left[\frac{2,28 \times 10^5 S_o^{1,667} (q_* L)^{1,583}}{L d_s} - 3,39 \times 10^2 S_o q_* \right] \quad (4.20)$$

Na equação (4.20), o fator de cobertura, C_v , é definido como a relação entre a área sem vegetação e a área total do terreno, de modo que C_v varia de zero (área totalmente coberta) a um (área sem vegetação). O coeficiente de erodibilidade, C_e , é uma medida da susceptibilidade ou resposta do solo às forças erosivas. É uma propriedade do solo e portanto, depende do tipo e natureza do solo, sendo seu valor igual a um quando o solo for totalmente solto isto é, quando as partículas do solo acharem-se prontamente disponíveis para preencher a capacidade de transporte do fluxo; e, deve ser menor que a unidade, diminuindo na proporção em que os efeitos de coesão se intensificam, exigindo maior capacidade de desprendimento dos agentes erosivos. (chuva e fluxo no caso).

A taxa de chuva que se converte em fluxo superficial, q_* , pode ser obtida por:

$$q_* = 2,778 \times 10^{-7} f I_m \quad (4.21)$$

na qual, I_m é a intensidade média da chuva, em milímetros por hora; e f é o coeficiente de deflúvio (relação entre a quantidade de chuva que esco superficialmente na declividade e a chuva total precipitada). Alguns valores aproximados de coeficientes de deflúvio para vários tipos de áreas de drenagem, podem ser encontrados nos livros de hidrologia (Chow, 1964).

4.3. Derivação da Equação Geral de Erosão com Base na Fórmula de Kalinske - Brown

Kalinske (Raudkivi, 1967) propôs uma fórmula de transporte de sedimentos que pode ser expressa como:

$$\frac{q_s}{U_* d_s} = a_s \left\{ \frac{U_*^2}{(S_s - 1) g d_s} \right\}^P \quad (4.22)$$

na qual, U_* é a velocidade de cisalhamento; a_s é uma constante; P é um expo

ente adimensional. As demais quantidades já foram definidas. Segundo Kalinske e Brown (Rouse, 1949), $a_s = 10$ e $P = 2,0$ para canais erodíveis.

Sendo $U_* = (\tau_o/\rho)^{1/2}$, a equação (4.22) com $a_s = 10$ e $P = 2,0$, torna-se:

$$q_s = \frac{10 (\tau_o)^{5/2}}{\rho^{5/2} [(S_s - 1)g]^2 d_s} \quad (4.23)$$

Diferenciando a equação (4.23) com relação a x e igualando dq_s/dx , à equação (4.1), obtém-se:

$$\frac{dq_s}{dx} = \frac{25 (\tau_o)^{3/2}}{\rho^{5/2} [(S_s - 1)g]^2 d_s} \cdot \frac{d\tau_o}{dx} = P_s \quad (4.24)$$

Substituindo a equação (4.4) na equação (4.24), obtém-se para fluxo turbulento:

$$\frac{dq_s}{dx} = \frac{25 \left\{ \gamma [(k + 0,012) v^{7/4} / 8g]^{1/3} S_o^{2/3} \right\}^{3/2} \frac{d\tau_o}{dx}}{\rho^{5/2} [(S_s - 1)g]^2 d_s} \quad (4.25)$$

Por outro lado, substituindo a equação (4.10) na equação (4.4) e derivando a expressão final com relação a x :

$$\frac{d\tau_o}{dx} = \frac{7 \gamma [(k + 0,012) v^{1/4} / 8g]^{1/3} S_o^{2/3} q_*(q_o + q_{*x})^{-5/12}}{12} \quad (4.26)$$

Substituindo a equação (4.26) na equação (4.25) obtém-se:

$$P_s = \frac{dq_s}{dx} = \frac{175 [(k + 0,012) v^{1/4} / 8g]^{5/6} S_o^{5/3} q_*(q_o + q_{*x})^{11/24}}{12 (S_s - 1)^2 g^{1/3} d_s} \quad (4.27)$$

Substituindo a equação (4.27) na equação (4.14) para $P_s dx$ tem-se:

$$E_s = \frac{175 [(k + 0,012) v^{1/4} / 8g]^{5/6} S_o^{5/3} q_*}{12 (S_s - 1)^2 L g^{1/3} d_s} \int_0^L (q_o + q_{*x})^{11/24} dx \quad (4.28)$$

Integrando a equação (4.28):

$$E_s = \frac{10 \left[(k + 0,012) v^{0,25/8} \right]^{5/6} S_o^{5/3}}{L (S_s - 1)^2 g^{1/3} d_s} \left[(q_o + q_*L)^{1,458} - (q_o)^{1,458} \right] \quad (4.29)$$

Quando $q_o = 0$, a equação (4.29) pode ser expressa como:

$$E_s = C_T (q_*L)^{1,458} (S_o)^{1,667} \quad (4.30)$$

onde,

$$C_T = \frac{10 \left[(k + 0,012) v^{0,25/8} \right]^{5/6}}{L (S_s - 1)^2 g^{1/3} d_s} \quad (4.31)$$

Substituindo os valores $k = 0,60$; $v = 8,5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$; $S_s = 2,65$; $g = 9,8 \text{ m/s}^2$; introduzindo os fatores C_v e C_e ; e expressando d_s em milímetros nas equações (4.29) e (4.30), a taxa de erosão, E_s , em metros cúbicos por segundo por metro quadrado, pode ser expressa como:

$$E_s = \frac{10,986 (C_v) (C_e) \left[(q_o + q_*L)^{1,458} - (q_o)^{1,458} \right] S_o^{1,667}}{L d_s} \quad (4.32)$$

e:

$$E_s = \frac{10,986 (C_v) (C_e) (q_*L)^{1,458} (S_o)^{1,667}}{L d_s}, \text{ para } q_o = 0 \quad (4.33)$$

Desde que se pode admitir que o peso específico do solo erodido seja $1300 \text{ kg}_f/\text{m}^3$, a taxa de erosão, E_s , em quilogramas por segundo por metro quadrado, pode ser expressa como:

$$E_s = \frac{1,43 \times 10^4 (C_v) (C_e) (q_*L)^{1,458} (S_o)^{1,667}}{L d_s} \quad (4.34)$$

4.4. Derivação da Equação Geral de Erosão com Base na Fórmula de Einstein - Brown

A fórmula de Einstein-Brown é uma modificação desenvolvida por Hun

ter Rouse, M.C. Boyer, e E.M. Laursen de uma fórmula desenvolvida por Einstein em 1942 (Vanoni, 1975). Seu nome deriva-se do nome do autor original e do autor do capítulo onde a fórmula apareceu pela 1^a (primeira) vez (Vanoni, 1975). A fórmula é:

$$\Phi = f (1/\psi) \quad (4.35)$$

onde,

$$\Phi = \frac{g_s}{\gamma_s F_1 \sqrt{g(S_s - 1) d_s^3}} \quad (4.36)$$

$$1/\psi = \frac{\tau_0}{\gamma (S_s - 1) d_s} \quad (4.37)$$

$$F_1 = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36 v^2}{g(S_s - 1) d_s^3}} - \sqrt{\frac{36 v^2}{g(S_s - 1) d_s^3}} \quad (4.38)$$

A equação (4.35) torna-se $\Phi = 40 (1/\psi)^3$ para $1/\psi$, maior que 0,09.

A fórmula de Einstein-Brown, baseou-se nos dados obtidos por Gilbert (1914) e Meyer-Peter e Muller, com sedimentos bem diversificados em tamanho e peso específico (Vanoni, 1975). As equações acima são válidas para qualquer sistema coerente de unidades.

Substituindo a equação (4.4) na equação (4.37) e expressando a fórmula de Einstein-Brown em termos dos parâmetros "a" e "b", obtêm-se respectivamente:

$$(1/\psi) = \frac{[(k + 0,012)q^{7/4} v^{1/4}/8g]^{1/3} S_o^{2/3}}{(S_s - 1) d_s} \quad (4.39)$$

$$\Phi = a (1/\psi)^b \quad (4.40)$$

Expressando o diâmetro médio (d_{50}) em milímetros, e substituindo

as equações (4.36) e (4.39) na equação (4.40), obtêm-se:

$$\frac{g_s \times 10^3}{\gamma_s F_* \sqrt{g(S_s - 1) d_s^3 / 10^3}} = a \left\{ \frac{10^3 [(k + 0,012) v^{1/4} / 8g]^{1/3} S_o^{2/3} q^{7/12}}{(S_s - 1) d_s} \right\}^b \quad (4.41)$$

onde,

$$F_* = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{3,6 \times 10^{10} v^2}{(S_s - 1) g d_s^3}} - \sqrt{\frac{3,6 \times 10^{10} v^2}{(S_s - 1) g d_s^3}} \quad (4.42)$$

Substituindo a equação (4.10) na equação (4.41) e derivando com relação a x:

$$\frac{dg_s}{dx} = \left\{ \frac{7a \gamma_s F_* b q_* \sqrt{g(S_s - 1) d_s^3 / 10^3}}{12 \times 10^3} \left\{ \frac{10^3 [(k + 0,012) v^{1/4} / 8g]^{1/3} S_o^{2/3}}{(S_s - 1) d_s} \right\}^b \right. \\ \left. (q_o + q_* x)^{(7b - 12)/12} \right\} \quad (4.43)$$

Substituindo a equação (4.43) na equação (4.14), obtêm-se:

$$E_s = \left\{ \frac{7a \gamma_s F_* b q_* \sqrt{g(S_s - 1) d_s^3 / 10^3}}{12 \times 10^3 L} \left\{ \frac{10^3 [(k + 0,012) v^{1/4} / 8g]^{1/3} S_o^{2/3}}{(S_s - 1) d_s} \right\}^b \right. \\ \left. \int_0^L (q_o + q_* x)^{(7b - 12)/12} dx \right\} \quad (4.44)$$

Integrando a equação (4.44):

$$E_s = \frac{a \gamma_s F_* C_E \sqrt{g(S_s - 1) d_s^3 / 10^3}}{1000 L} \cdot \left[(q_o + q_* L)^{7b/12} - (q_o)^{7b/12} \right] S_o^{2b/3} \quad (4.45)$$

$$C_E = \left[\frac{10^3 [(k + 0,012) v^{1/4} / 8g]^{1/3}}{(S_1 - 1) d_s} \right]^b \quad (4.46)$$

Quando $q_0 = 0$, a equação (4.45) pode ser expressa como:

$$E_s = \frac{a \gamma_s F_* C_E \sqrt{g(S_s - 1) d_s^3 / 10^3}}{1000 L} (q_* L)^{7b/12} (S_o)^{2b/3} \quad (4.47)$$

Substituindo os valores $v = 8,5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$; $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ e $S_s = 2,65$ na equação (4.42), obtém-se:

$$F_* = \frac{\sqrt{(2d_s^3 + 0,0048) / 3d_s} - \sqrt{0,0016/d_s}}{d_s} \quad (4.48)$$

Introduzindo os coeficientes C_v ; C_e ; substituindo $k = 0,60$; $v = 8,5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$; $\gamma_s = 1300 \text{ kg}_f/\text{m}^3$; $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ e admitindo $a = 40$ e $b = 3$ na equação (4.47), a taxa de erosão, E_s , em quilogramas por segundo por metro quadrado pode ser expressa como:

$$E_s = \frac{3,52 \times 10^5 F_* (C_v) (C_e) (q_* L)^{1,75} (S_o)^{2,0}}{L (d_s)^{1,5}} \quad (4.49)$$

4.5. Comentários sobre o Desenvolvimento Analítico das Equações de Erosão

As equações (4.20), (4.34) e (4.49) derivadas nas secções 4.2, 4.3 e 4.4, fornecem um meio de calcular a taxa de erosão do solo causada pela chuva. Deve-se lembrar que não se pode afirmar, a priori, qual das equações fornecerá melhor resultado por razão que na aplicação das fórmulas de transporte, um grande número de hipóteses é introduzido implicitamente no desenvolvimento das equações. Assim, cada uma das equações (4.20), (4.34) ou (4.49) poderá fornecer resultados satisfatórios em condições diferentes. Isto somente poderá ser verificado através da aplicação destas fórmulas a situações práticas de modo a avaliá-las comparativamente.

Os dados de campo que incluem informações adequadas de erosão juntamente com as características de solo e chuva são muito raros. Não sendo possível obter dados de erosão no Brasil a única maneira de se avaliar as

equações, ficou por conta da utilização de dados disponíveis na bibliografia estrangeira, com as limitações de nunca se dispor das informações completas e, não tendo um meio de verificar os dados nos casos de dúvida.

Visando um estudo comparativo entre as equações e, com o objetivo de desenvolver um método para aplicação no campo, foram utilizados os dados do Instituto Internacional de Agricultura Tropical da Nigéria (Lal, 1975). O processo de aplicação e os cálculos são apresentados no capítulo seguinte.

CAPÍTULO V

PREVISÃO DAS TAXAS DE EROSÃO

5.1. Os Dados do Instituto Internacional de Agricultura Tropical da Nigéria

De 1972 a 1974 um extenso trabalho de pesquisa em campo com chuvas naturais, foi conduzido por Lal (1975), no Instituto Internacional de Agricultura Tropical (IITA), na região de Ibadan, na Nigéria. Os experimentos foram conduzidos em solos Oxic Paleustalf (USDA), Ferric Luvisol (FAO), ou da ordem alfisol, na parte ocidental da Nigéria entre os paralelos 6° e 8° de latitude norte, e os meridianos de 3° e 6° de longitude leste. A região apresenta uma precipitação média anual de 1100 a 1300 mm. Devido o padrão bi-modal da distribuição das chuvas, há duas estações chuvosas. A primeira que se estende de fins de março a fins de julho, seguindo de um curto período seco com cerca de um mês, vindo a segunda estação, mais curta que a primeira, que vai de fins de agosto a fins de dezembro.

5.2. Organização das Parcelas e Medição da Erosão

Vinte e quatro parcelas experimentais (plots) foram construídas em solos bem drenados derivados de materiais xistosos de gneisse biotítico de fina granulação. Apresentam textura de médio a leve, próximo a superfície, com uma sub-camada areno-argilosa a argilosa, e uma camada de quartzo angular e sub-angular imediatamente abaixo. Estes solos são classificados na or-

dem alfisol, sendo dado maiores detalhes quanto às suas características pedológicas, físicas e químicas em uma referência citada por Lal (1975).

As parcelas foram localizadas em declividades naturais seguindo uma toposequência (Fig. 5.1), havendo variações locais na textura do solo entre e dentre as parcelas. Quatro declividades foram construídas com valores nominais de 1, 5, 10 e 15%, sendo que as declividades reais variavam para cada caso. (no estudo citado considerou-se quatro declividades de 1,1; 5,7, 8,7 e 14,6%). Todas as parcelas mediam 25 x 4m, com 1m entre as parcelas adjacentes para facilitar as operações e manuseio do experimento.

Foram construídas cinco parcelas para cada declividade constituindo-se cada uma de um tratamento diferente com relação à cobertura vegetal, já que o autor estudou a influência da cobertura no controle das perdas de solo e água. A natureza do presente estudo toma em consideração somente o tratamento sem vegetação para cada declividade. Mais duas outras parcelas adicionais de 12,5m e 37,5m de comprimento foram construídas com declividades de 10 e 15%. Com excessão da declividade de 8,7%, as demais declividades aqui consideradas, apresentaram irregularidades nas suas formas, conforme relata o próprio Lal (1975).

Em cada parcela, construiu-se uma borda de proteção com asbesto fincado, em cerca de 30 cm abaixo da superfície do terreno e com 15cm acima, em ambos os lados da parcela, para evitar a entrada ou saída lateral de fluxo. Esta borda de proteção foi também construída na extremidade superior da declividade, porém com menor altura de modo a facilitar a entrada de um pequeno trator para execução de operações de manutenção.

As perdas de solo e água eram imediatamente coletadas após cada chuva em cada parcela, através de tanques receptores instalados na extremidade inferior das parcelas. Os sedimentos erodidos em cada declividade foram pesados e processados separadamente para análise física e química. Uma amostra representativa do deflúvio superficial de cada chuva foi coletada para determinar as concentrações de elementos sólidos (sedimentos) e nutrientes no fluxo.

5.3. Limitações dos Dados Publicados

Um bom número de dados foi fornecido pelo autor, apresentando, contudo alguns aspectos confusos, que limitaram a aplicabilidade dos mesmos. Com relação às características das chuvas, por exemplo, as intensidades média e máxima de algumas chuvas, figuram em uma tabela da referência (Lal ,

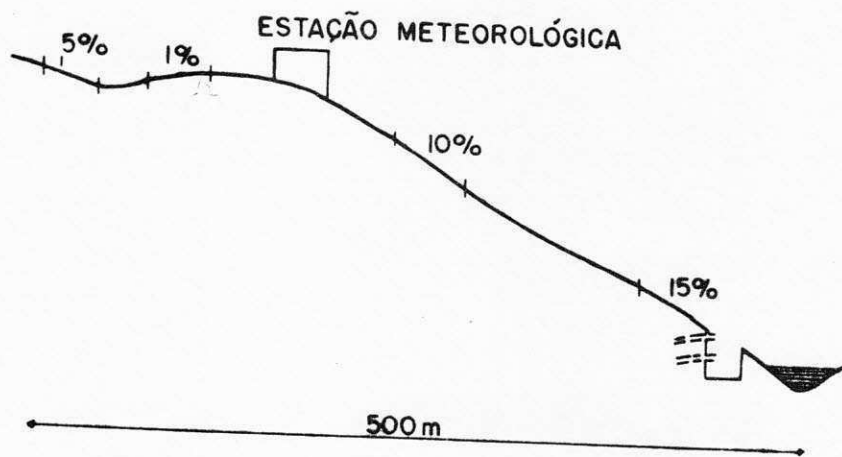


Fig. 5.1 - Localização aproximada das parcelas experimentais para diferentes declividades ao longo da toposequência.

1975) com certo valor, aparecendo com valor diferente em outra, sem nenhum critério ou elemento justificativo. Também, o padrão de distribuição da chuva, fator importante na avaliação de suas características erosivas, não foi disponível. Outro aspecto a considerar, diz respeito à indisponibilidade da granulometria do solo, dispondo-se tão somente de uma separação dos sedimentos erodidos em categorias de argila, silte, areia e cascalho, que segundo o próprio Lal (1975), diferem na sua composição textural dos da superfície do solo da qual originaram-se. Quanto às características da superfície do solo, Lal (1975) chama atenção para um certo número de variações consideráveis observadas na textura entre as parcelas, e mesmo dentro delas. Tal fato, constitui-se em uma fonte de erros que pode afetar consideravelmente os valores previstos pelos modelos para as taxas de erosão, uma vez que os modelos são sensivelmente dependentes da variável representativa do diâmetro médio ou efetivo do material da superfície de erosão. Além disso, os modelos pressupõem formas uniformes para as declividades, o que não ocorre com as declividades consideradas (Lal, 1975).

O próprio processo de medição das taxas de erosão e portanto, da produção de sedimentos pela chuva, engloba fatores distorsantes dos valores reais, devido a inclusão de efeitos residuais de chuvas antecedentes na produção de sedimentos. Os efeitos residuais referem-se aqui, ao material desprendido e transportado ao longo da declividade no decorrer de uma certa chuva, mas que não chega a atingir os tanques coletores na extremidade inferior do declive. Posteriormente, este material poderá ser eventualmente transportado por outra chuva que mesmo com capacidade de desprendimento inferior a da anterior, produz escoamento superficial capaz de transportar o material anteriormente desprendido a pequenas distâncias, levando-o portanto, aos tanques coletores. Tais efeitos portanto, são provavelmente responsáveis pelo fato de certas chuvas de características erosivas potencialmente baixas, produzirem altas taxas de erosão. Tais efeitos jamais poderão ser eliminados dentro dos processos convencionais de medição de erosão.

5.4. Hipóteses Admitidas na Utilização dos Dados

A falta de dados próprios e de outros autores, forçou a adoção de algumas hipóteses a partir das quais estabeleceu-se certos critérios para a utilização dos dados de Lal (1975).

5.4.1. A Distribuição Hipotética das Chuvas Naturais

Admite-se que o padrão de distribuição das chuvas seja único e tome a forma triangular, com um único pico (Fig. 5.2). Uma chuva artificial uniforme com mesma altura pluviométrica que a chuva natural hipotética de padrão triangular, produzirá $I_m = I_{max}/2$. Tal critério baseia-se na suposição que os modelos de erosão desenvolvidos neste estudo, pressupõem que as chuvas sejam uniformes, isto é, com intensidades constantes, o que não corresponde ao evento natural e pode portanto, acarretar erros caso seja assim considerado. Por outro lado, tal suposição também se justifica por razão que Lal (1975) apresentou em seus dados somente informações sobre a intensidade máxima das precipitações e a altura total das chuvas. Deve-se lembrar que a altura total da chuva inclui as fases de menor intensidade, correspondentes, ao início e fim da precipitação, respectivamente, nas quais não ocorre erosão. Assim, foi necessário obter a intensidade média como a metade da intensidade máxima e, admitir a duração da chuva como a relação entre a precipitação total e a intensidade média.

5.4.2. A Duração das Chuvas

O segundo critério elimina da análise as chuvas com mais de uma hora de duração. Este critério baseia-se na hipótese de que a duração da erosão (intervalo de tempo no qual ocorre a erosão durante uma chuva) não é exatamente igual à duração da chuva. Em uma chuva isolada, os períodos inicial e final são em geral caracterizados por intensidades muito fracas que não produzem erosão. Em geral, entre o início da precipitação e a formação do escoamento superficial, decorre certo intervalo de tempo onde a erosão ocorre por conta do embate das gotas de chuva. Este tipo de erosão tende a diminuir dentro deste intervalo de tempo inicial, à proporção em que se forma e aumenta de espessura a lâmina d'água (que amortiza o impacto das gotas) sobre a superfície do terreno. No caso de declividades muito pequenas, há nesta fase inicial, uma distribuição aproximadamente uniforme das partículas desprendidas e arremessadas pelas gotas de chuva, em todas as direções. Para declividades mais íngremes, observa-se um saldo líquido de material deslocado na direção do declive. No entanto, a capacidade de transporte das gotas é desprezível em relação à do escoamento superficial, de tal modo que a taxa de erosão somente ganha proporções quando as águas superficiais aumentam de volume e velocidade. Na fase final da chuva, o escoamento superficial reduz

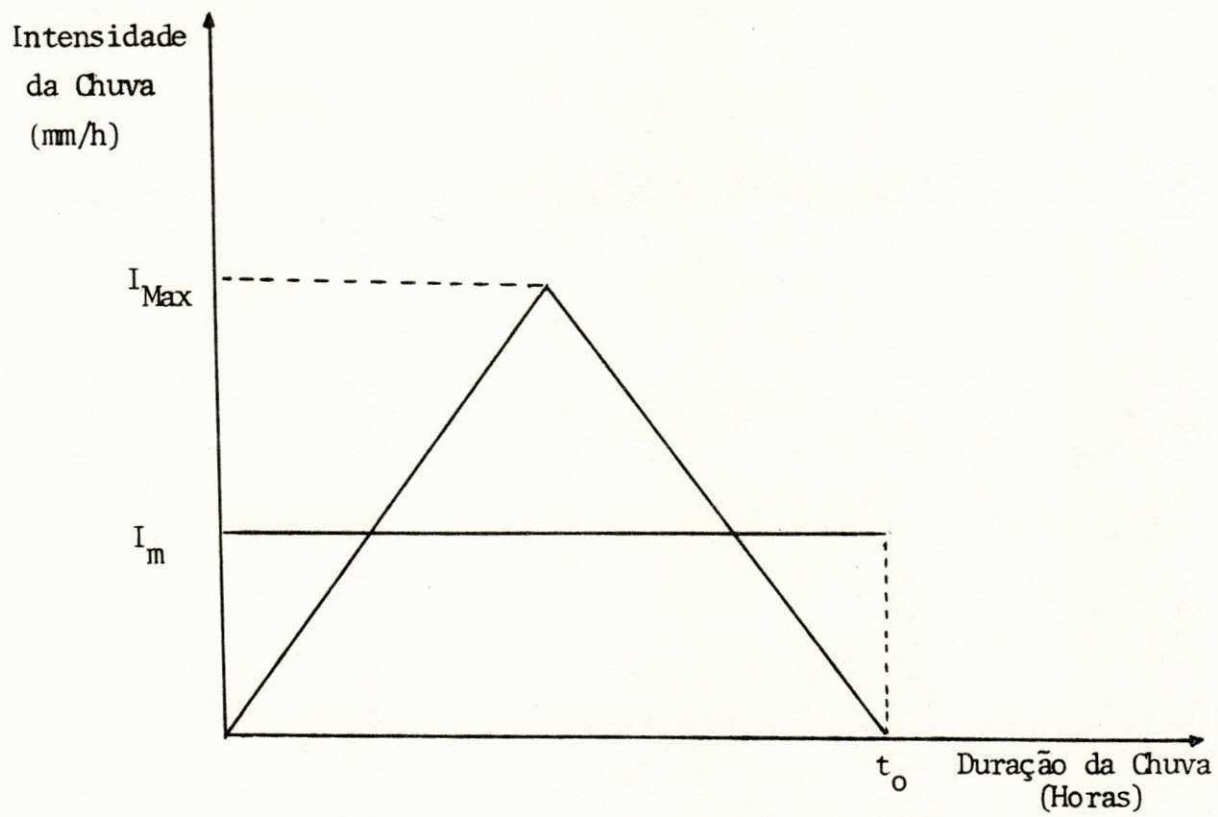


Fig. 5.2 - Distribuição hipotética de uma chuva natural com respeito a uma chuva artificial uniforme.

sua velocidade e inicia-se uma etapa de deposição à medida em que a capacidade de transporte do fluxo diminui. Assim, se a duração total da chuva é usada no cálculo das taxas de erosão, os valores serão muito altos e as equações superestimarão as quantidades de erosão. Este problema se torna tanto mais sério quanto maior for a duração da chuva; por razão da distribuição não uniforme da precipitação (o padrão da chuva tende a tornar-se bastante complexo e irregular nas chuvas de longa duração). Como estas informações não eram disponíveis, admitiu-se a eliminação de chuvas cuja duração provavelmente vinhessem a estabelecer padrões bastante conflitantes com o padrão hipotético admitido. A comparação entre valores medidos e calculados, comprovou a hipótese formulada, de tal forma que para as chuvas com mais de uma hora de duração, os modelos superestimaram as taxas de erosão.

5.4.3. O Diâmetro Efetivo dos Sedimentos

Uma das maiores limitações quanto ao uso no campo das fórmulas de carga do leito, fica por conta da determinação do diâmetro efetivo ou, diâmetro representativo do material sólido transportado. As fórmulas de carga do leito mostram-se bastante sensíveis a qualquer variação do diâmetro do sedimento por razão do diâmetro juntamente com a forma influem no estabelecimento das condições de transporte. Em geral, as fórmulas de carga do leito foram desenvolvidas sob condições controladas de laboratório, usando-se sedimentos artificiais de diâmetro e forma conhecidos. A dispersão e variedade de tamanhos e formas das partículas sólidas naturais, comparado com a uniformidade das partículas artificiais, pode ser possivelmente uma das causas das grandes distorções entre os resultados obtidos no laboratório e no campo. Assim, mesmo dispondo da distribuição granulométrica do material a ser carregado pelo fluxo, a escolha de um critério para o estabelecimento do diâmetro efetivo, torna-se bastante difícil. Alguns autores consideram tal diâmetro como sendo o d_{50} ou seja, diâmetro correspondente ao tamanho para o qual 50% do material é mais fino ou grosso. Outros autores preferem usar tamanhos diferentes, tais como d_{90} (fórmula de Meyer-Peter e Muller); d_{65} e d_{35} (fórmula de Einstein), etc. Nas equações de erosão presentemente desenvolvidas, recomenda-se o d_{50} como diâmetro efetivo.

Nos seus dados, Lal (1975) não apresentou as curvas granulométricas dos materiais carregados pelas chuvas, mas tão somente a distribuição percentual desse material em frações de argila, silte, areia e cascalho. Este fato torna bastante difícil a determinação do d_{50} . No entanto, dispondo do

papel de granulometria, com base na distribuição percentual das frações do solo, se pode traçar duas curvas limites entre as quais, a curva real de granulometria provavelmente estará contida. Assim, para cada amostra de material colhida nos tanques coletores (Lal, 1975), traçou-se duas curvas granulométricas, utilizando a classificação da A.B.N.T. (Fig.5.3). Estas curvas foram traçadas, com base nos quatro pontos representativos das diferentes classes texturais do solo. Pela curva II (Fig.5.3) por exemplo, tem-se o d_{50} máximo possível para a distribuição percentual dada. Esta curva é obtida, utilizando-se os extremos superiores de cada classe textural versus porcentagem em peso ou volume do material. O d_{50} mínimo provável é igualmente obtido, utilizando-se a curva I, que é traçada usando-se os extremos inferiores das classes texturais. Dispondo então, dos prováveis d_{50} máximo e mínimo para cada chuva, calculou-se um d_{50} médio, de tal modo que a média dos 200 valores médios obtidos foi 0,1 mm, sendo portanto, o valor adotado neste trabalho. A Fig.5.3 mostra as curvas granulométricas extremas, dentro das quais se encontra a curva real para a amostra com 8% de argila; 12% de silte; 60% de areia; e 20% de pedregulho, usada no exemplo.

5.4.4. Método de Cálculo da Erosão

Na aplicação das equações (4.20), (4.34) e (4.49), admitiu-se $C_e = 1$ e $C_v = 1$. A ausência de vegetação nas parcelas experimentais, justifica a adoção do valor unitário para C_v . Quanto ao coeficiente de erodibilidade, C_e , embora admitido como unitário, deve-se notar que a avaliação do mesmo é extremamente complexa e carece de estudos. Também, não se tomou em conta a influência da forma da declividade no processo de erosão. Este aspecto é de relevante importância e também necessita de estudos.

As características das chuvas, os efeitos das diferentes declividades nas perdas de solo e água em solos desprovidos de vegetação, bem como, as taxas de erosão medida e calculada, são apresentadas nas tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

UFPA/BIRINTROVA

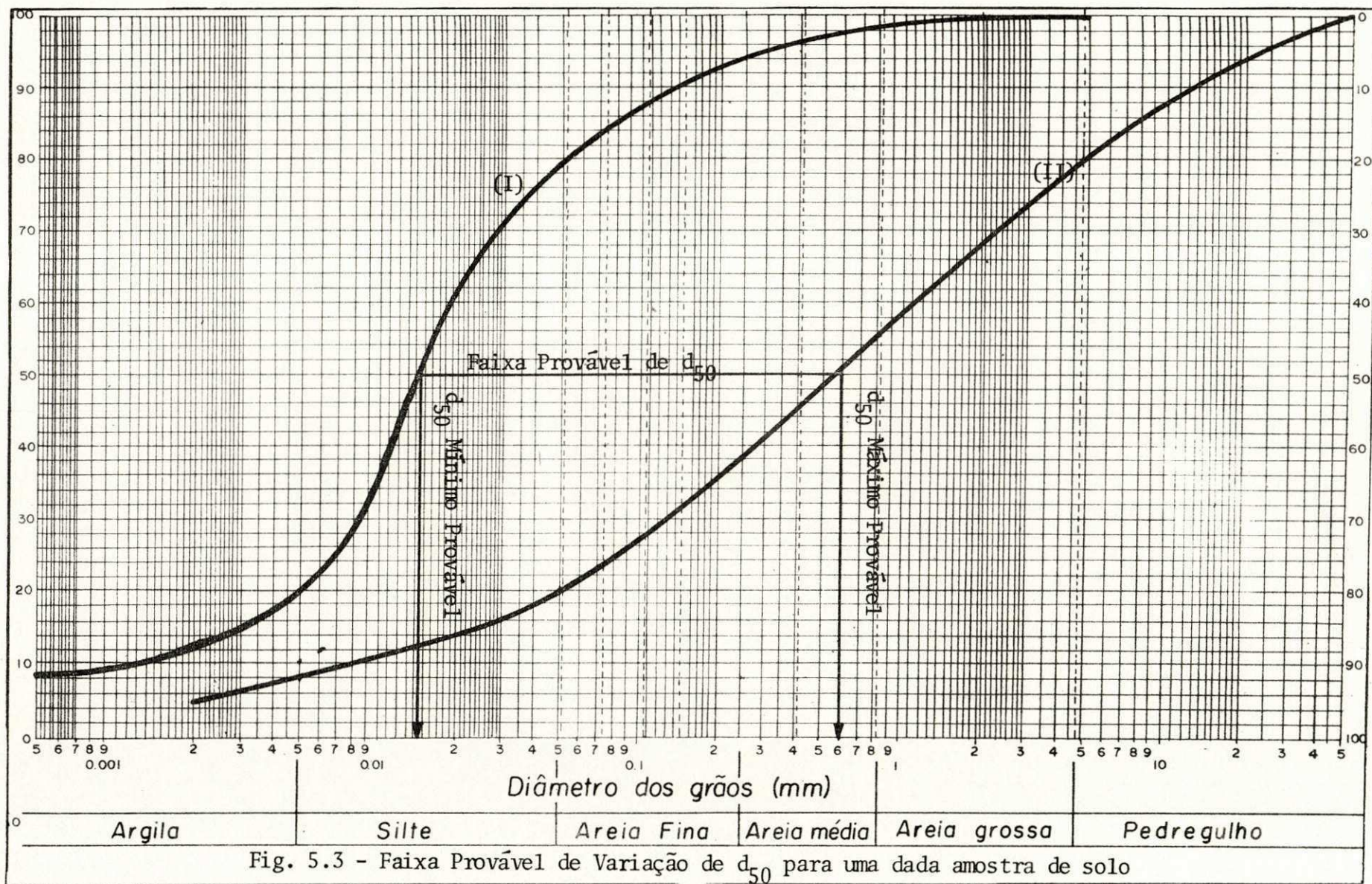


Fig. 5.3 - Faixa Provável de Variação de d_{50} para uma dada amostra de solo

Tabela 5.1 - Registros Individuais de Chuva, Escoamento Superficial e Taxa de Erosão Medida e Calculada Durante 1972/73 ($S_o = 0,011$)

Data	h (mm)	I_m (mm/h)	t_o (h)	q (mm)	$f = q/h$	q_* ($m^3/s/m^2$) $\times 10^{-6}$	Taxa de Erosao (ton/ha)			
							Medida (Lal, 1975).	Equa ção 4.20	Equa ção 4.34	Equa ção 4.49
1972										
30/04	10,8	40,64	0,26	0,5	0,046	0,519	0,04	0,00	0,00	0,00
04/05	20,0	30,48	0,66	0,8	0,040	0,339	0,06	0,00	0,00	0,00
08/05	13,3	18,29	0,73	0,6	0,045	0,228	0,04	0,00	0,00	0,00
11/05	12,7	15,24	0,83	0,9	0,071	0,300	0,03	0,00	0,00	0,00
14/05	13,3	20,32	0,65	0,8	0,060	0,339	0,04	0,00	0,00	0,00
27/05	5,1	18,29	0,28	0,3	0,059	0,300	0,00	0,00	0,00	0,00
29/05	10,8	20,32	0,53	2,4	0,222	1,250	0,03	0,00	0,02	0,00
31/05	10,8	25,40	0,42	2,9	0,268	1,890	0,04	0,00	0,02	0,01
02/06	5,1	15,24	0,33	0,2	0,039	0,165	0,00	0,00	0,00	0,00
04/06	9,5	20,32	0,47	1,2	0,126	0,711	0,01	0,00	0,01	0,00
07/06	9,4	15,24	0,62	1,7	0,181	0,766	0,04	0,00	0,01	0,00
09/06	10,8	27,43	0,39	3,7	0,342	2,610	0,10	0,03	0,03	0,01
16/06	11,4	25,40	0,45	0,9	0,079	0,557	0,03	0,00	0,00	0,00
20/06	10,9	15,24	0,71	2,1	0,192	0,813	0,04	0,00	0,01	0,00
23/06	6,9	15,24	0,45	3,0	0,435	1,840	0,15	0,00	0,02	0,01
28/06	7,6	25,40	0,30	0,6	0,079	0,557	0,03	0,00	0,00	0,00
03/07	15,2	45,72	0,33	5,7	0,375	4,760	0,19	0,15	0,07	0,02
04/07	8,3	25,40	0,32	3,1	0,373	2,630	0,11	0,02	0,03	0,01
17/07	8,9	15,24	0,58	0,6	0,067	0,283	0,01	0,00	0,00	0,00
07/09	12,7	26,41	0,48	1,7	0,134	0,983	0,12	0,00	0,01	0,00
08/09	11,4	15,24	0,75	0,4	0,035	0,148	0,00	0,00	0,00	0,00
16/09	12,4	25,40	0,49	0,7	0,056	0,395	0,00	0,00	0,00	0,00
21/09	30,5	50,80	0,60	9,6	0,315	4,440	0,26	0,23	0,11	0,03
25/09	13,3	25,40	0,52	2,7	0,203	1,430	0,15	0,00	0,02	0,00
26/09	10,9	12,70	0,86	1,4	0,128	0,452	0,00	0,00	0,01	0,00
03/10	12,7	15,24	0,83	0,4	0,031	0,131	0,00	0,00	0,00	0,00
1973										
17/02	8,9	25,40	0,35	1,5	0,168	1,180	0,00	0,00	0,01	0,00
25/03	10,4	15,24	0,68	3,6	0,346	1,460	0,00	0,00	0,03	0,01
04/04	34,0	35,56	0,96	3,7	0,109	1,080	0,46	0,00	0,02	0,00
25/04	4,1	16,26	0,25	0,4	0,097	0,438	0,03	0,00	0,00	0,00
27/04	24,5	35,56	0,69	5,7	0,233	2,300	0,19	0,03	0,05	0,01
06/05	16,5	20,32	0,81	6,3	0,382	2,160	0,26	0,02	0,05	0,01
24/05	17,0	30,48	0,56	3,6	0,212	1,790	0,19	0,00	0,03	0,01
31/05	13,5	45,72	0,29	5,7	0,422	5,360	0,24	0,17	0,07	0,02
05/06	19,1	35,56	0,54	7,7	0,403	3,980	0,18	0,16	0,09	0,02
08/06	7,6	20,32	0,37	0,7	0,092	0,519	0,00	0,00	0,00	0,00
13/06	22,9	30,48	0,75	8,3	0,362	3,060	0,17	0,10	0,08	0,02
21/06	6,9	15,24	0,45	1,1	0,159	0,673	0,03	0,00	0,01	0,00
25/06	5,3	10,16	0,52	1,9	0,358	1,010	0,03	0,00	0,01	0,00
02/07	25,4	25,40	1,00	16,2	0,638	4,500	0,22	0,40	0,20	0,06
05/07	14,5	25,40	0,57	7,0	0,483	3,410	0,17	0,11	0,07	0,02
27/07	11,4	15,24	0,75	2,2	0,193	0,817	0,03	0,00	0,01	0,00
01/08	9,4	10,16	0,92	3,0	0,319	0,900	0,13	0,00	0,02	0,00
23/09	27,9	60,96	0,46	13,6	0,487	8,250	0,26	0,69	0,22	0,08
29/09	25,9	30,48	0,85	18,9	0,730	6,180	0,36	0,70	0,26	0,08
03/10	11,2	15,24	0,73	6,6	0,589	2,490	0,35	0,04	0,06	0,01
13/10	18,2	30,48	0,60	6,7	0,368	3,110	0,07	0,08	0,07	0,02
18/10	5,8	20,32	0,28	0,7	0,121	0,683	0,00	0,00	0,00	0,00
27/10	15,8	40,64	0,39	4,6	0,291	3,280	0,14	0,06	0,05	0,01
30/10	29,5	30,48	0,98	12,2	0,413	3,500	0,22	0,20	0,13	0,04

Tabela 5.2 - Registros Individuais de Chuva, Escoamento Superficial e Taxa de Erosão Medida e Calculada Durante 1972/73 ($S_o = 0,057$)

Data	h (mm)	I_m (mm/h)	t_o (h)	q (mm)	f = q/h	q_* ($m^3/s/m^2$) $\times 10^{-6}$	Taxa de Erosao (ton/ha)			
							Medida (Lal, 1975).	Equa ção 4.20	Equa ção 4.34	Equa ção 4.49
1972										
30/04	10,8	40,64	0,26	0,4	0,037	0,418	0,01	0,02	0,02	0,01
04/05	20,0	30,48	0,66	0,6	0,030	0,254	0,09	0,00	0,03	0,01
08/05	13,3	18,29	0,73	0,2	0,015	0,076	0,00	0,00	0,01	0,00
11/05	12,7	15,24	0,83	0,7	0,055	0,233	0,02	0,00	0,03	0,01
14/05	13,3	20,32	0,65	3,1	0,233	1,320	0,22	0,85	0,33	0,12
27/05	5,1	18,29	0,28	0,2	0,039	0,198	0,00	0,00	0,01	0,00
29/05	10,8	20,32	0,53	3,0	0,278	1,570	0,11	0,97	0,35	0,13
31/05	10,8	25,40	0,42	3,6	0,333	2,350	0,16	1,64	0,50	0,21
02/06	5,1	15,24	0,33	0,1	0,019	0,081	0,00	0,00	0,00	0,00
04/06	9,5	20,32	0,47	2,0	0,210	1,190	1,34	0,50	0,21	0,07
07/06	9,4	15,24	0,62	3,1	0,330	1,400	0,67	0,91	0,34	0,12
09/06	10,8	27,43	0,39	6,3	0,583	4,440	1,20	4,71	1,16	0,59
16/06	11,4	25,40	0,45	4,3	0,377	2,660	0,92	2,20	0,64	0,28
20/06	10,9	15,24	0,71	1,6	0,147	0,622	0,18	0,17	0,12	0,03
23/06	6,9	15,24	0,45	2,1	0,304	1,290	0,71	0,56	0,22	0,08
28/06	7,6	25,40	0,30	1,3	0,171	1,210	0,92	0,33	0,13	0,05
03/07	15,2	45,72	0,33	8,3	0,546	6,930	2,02	8,54	1,88	1,08
04/07	8,3	25,40	0,32	3,7	0,446	3,150	1,61	2,12	0,58	0,26
17/07	8,9	15,24	0,58	2,2	0,247	1,040	0,86	0,46	0,21	0,07
07/09	12,7	26,41	0,48	3,0	0,236	1,730	0,69	1,06	0,36	0,14
08/09	11,4	15,24	0,75	0,5	0,044	0,186	0,01	0,00	0,02	0,00
15/09	12,4	25,40	0,49	0,3	0,024	0,169	0,01	0,00	0,01	0,00
21/09	30,5	50,80	0,60	3,6	0,118	1,660	2,56	1,23	0,43	0,16
25/09	13,3	25,40	0,52	3,6	0,271	1,910	1,52	1,39	0,45	0,18
26/09	10,9	12,70	0,86	3,6	0,330	1,160	1,58	0,87	0,36	0,12
03/10	12,7	15,24	0,83	0,9	0,071	0,300	0,34	0,00	0,05	0,01
1973										
17/02	8,9	25,40	0,35	2,2	0,247	1,740	0,68	0,78	0,27	0,10
25/03	10,4	15,24	0,68	3,6	0,346	1,460	0,93	1,08	0,40	0,15
04/04	34,0	35,56	0,96	9,0	0,265	2,620	2,36	4,57	1,33	0,57
25/04	4,1	16,26	0,25	1,0	0,244	0,895	0,60	0,14	0,07	0,02
27/04	24,5	35,56	0,69	9,6	0,392	3,870	1,83	6,57	1,68	0,82
06/05	16,5	20,32	0,81	6,3	0,982	2,160	2,13	2,71	0,85	0,35
24/05	17,0	30,48	0,56	8,3	0,488	4,130	1,62	5,97	1,50	0,74
31/05	13,5	45,72	0,29	6,3	0,467	5,930	2,00	5,76	1,32	0,72
05/06	19,1	35,56	0,54	8,6	0,450	4,440	3,92	6,53	1,61	0,81
08/06	7,6	20,32	0,37	0,2	0,026	0,146	1,19	0,00	0,01	0,00
13/06	22,9	30,48	0,75	7,0	0,306	2,590	5,54	3,50	1,02	0,44
21/06	6,9	15,24	0,45	0,9	0,130	0,550	0,86	0,08	0,06	0,02
25/06	5,3	10,16	0,52	0,2	0,038	0,107	2,41	0,00	0,01	0,00
02/07	25,4	25,40	1,00	20,2	0,795	5,610	9,84	18,08	4,20	2,26
05/07	14,5	25,40	0,57	4,4	0,303	2,140	3,81	1,88	0,59	0,24
27/07	11,4	15,24	0,75	2,1	0,184	0,779	1,37	0,32	0,18	0,05
01/08	9,4	10,16	0,92	5,0	0,532	1,500	1,37	1,55	0,56	0,21
23/09	27,9	60,96	0,46	15,6	0,559	9,470	3,17	20,13	4,14	2,60
29/09	25,9	30,48	0,85	20,2	0,780	6,600	6,76	20,27	4,52	2,56
03/10	11,2	15,24	0,73	7,0	0,625	2,650	3,97	3,55	1,03	0,44
13/10	18,2	30,48	0,60	7,7	0,423	3,580	3,51	4,98	1,31	0,62
18/10	5,8	20,32	0,28	1,0	0,172	0,971	0,19	0,19	0,09	0,03
27/10	15,8	40,64	0,39	11,6	0,734	8,290	3,75	13,66	2,89	1,75
30/10	29,5	30,48	0,98	4,9	0,168	1,420	1,70	1,48	0,55	0,20

Tabela 5.3 - Registros Individuais de Chuva, Escoamento Superficial e Taxa de Erosão Medida e Calculada Durante 1972/73 ($S_o = 0,087$)

Data	h (mm)	I _m (mm/h)	t _o (h)	q (mm)	f = q/h	q* (m ³ /s/m ²) x 10 ⁻⁶	Taxa de Erosao (ton/ha)			
							Medida (Lal , 1975).	Equa ção 4.20	Equa ção 4.34	Equa ção 4.49
1972										
30/04	10,8	40,64	0,26	0,5	0,046	0,519	0,06	0,12	0,07	0,02
04/05	20,0	30,48	0,66	0,6	0,030	0,254	0,06	0,04	0,06	0,02
08/05	13,3	18,29	0,73	0,8	0,060	0,305	0,02	0,09	0,09	0,02
11/05	12,7	15,24	0,83	0,3	0,024	0,102	0,02	0,00	0,02	0,00
14/05	13,3	20,32	0,65	2,0	0,150	0,847	0,16	0,86	0,35	0,13
27/05	5,1	18,29	0,28	0,3	0,059	0,300	0,00	0,03	0,03	0,01
29/05	10,8	20,32	0,53	3,4	0,315	1,780	0,12	2,83	0,84	0,38
31/05	10,8	25,40	0,42	1,8	0,166	1,170	0,12	1,04	0,36	0,14
02/06	5,1	15,24	0,33	1,1	0,215	0,910	0,70	0,51	0,20	0,07
04/06	9,5	20,32	0,47	2,6	0,274	1,550	1,79	1,95	0,61	0,26
07/06	9,4	15,24	0,62	1,8	0,191	0,808	0,79	0,75	0,31	0,11
09/06	10,8	27,43	0,39	3,3	0,305	2,320	1,30	3,34	0,91	0,44
16/06	11,4	25,40	0,45	3,0	0,263	1,850	0,84	2,57	0,76	0,34
20/06	10,9	15,24	0,71	3,0	0,275	1,160	2,02	1,73	0,60	0,24
23/06	6,9	15,24	0,45	2,7	0,391	1,650	0,83	2,09	0,64	0,28
28/06	7,6	25,40	0,30	0,8	0,105	0,741	0,56	0,31	0,13	0,05
03/07	15,2	45,72	0,33	7,1	0,467	5,930	4,39	13,94	3,03	1,92
04/07	8,3	25,40	0,32	3,7	0,446	3,150	2,56	4,64	1,17	0,61
17/07	8,9	15,24	0,58	0,9	0,101	0,427	0,54	0,17	0,12	0,03
07/09	12,7	26,41	0,48	0,9	0,071	0,521	0,24	0,23	0,13	0,04
08/09	11,4	15,24	0,75	0,6	0,052	0,220	0,01	0,02	0,06	0,01
16/09	12,4	25,40	0,49	0,2	0,016	0,113	0,00	0,00	0,01	0,00
21/09	30,5	50,80	0,60	4,7	0,154	2,170	5,86	4,55	1,27	0,60
25/09	13,3	25,40	0,52	3,7	0,278	1,960	2,47	3,29	0,95	0,44
26/09	10,9	12,70	0,86	3,4	0,312	1,100	1,76	1,89	0,68	0,26
03/10	12,7	15,24	0,83	0,8	0,063	0,267	0,27	0,06	0,08	0,02
1973										
17/02	8,9	25,40	0,35	1,3	0,146	1,030	0,82	0,68	0,25	0,09
25/03	10,4	15,24	0,68	3,7	0,356	1,510	1,00	2,70	0,85	0,36
04/04	34,0	35,56	0,96	4,4	0,129	1,270	2,01	2,77	0,93	0,38
25/04	4,1	16,26	0,25	0,8	0,195	0,881	0,73	0,36	0,14	0,05
27/04	24,5	35,56	0,69	9,6	0,392	3,870	7,62	14,21	3,40	1,90
06/05	16,5	20,32	0,81	7,0	0,424	2,390	4,62	7,27	1,98	0,96
24/05	17,0	30,48	0,56	5,0	0,294	2,490	2,46	5,40	1,45	0,71
31/05	13,5	45,72	0,29	6,3	0,467	5,930	5,66	12,25	2,67	1,68
05/06	19,1	35,56	0,54	5,7	0,298	2,940	5,00	6,95	1,78	0,92
08/06	7,6	20,32	0,37	0,9	0,118	0,666	0,58	0,30	0,14	0,05
13/06	22,9	30,48	0,75	10,3	0,450	3,810	9,23	15,04	3,62	2,01
21/06	6,9	15,24	0,45	0,6	0,087	0,368	0,60	0,09	0,07	0,02
25/06	5,3	10,16	0,52	1,8	0,340	0,960	0,92	0,88	0,34	0,12
02/07	25,4	25,40	1,00	10,3	0,405	2,860	5,42	12,27	3,17	1,62
05/07	14,5	25,40	0,67	5,7	0,393	2,770	2,39	6,62	1,73	0,87
27/07	11,4	15,24	0,75	0,5	0,044	0,186	0,02	0,00	0,04	0,01
01/08	9,4	10,16	0,92	3,1	0,330	0,931	1,33	1,47	0,57	0,21
23/09	27,9	60,96	0,46	20,1	0,720	12,200	11,40	63,99	12,11	9,45
29/09	25,9	30,48	0,85	20,2	0,780	6,600	6,39	42,93	9,13	5,96
03/10	11,2	15,24	0,73	5,0	0,446	1,890	3,09	4,33	1,27	0,57
13/10	18,2	30,48	0,60	6,3	0,346	2,930	2,69	7,67	1,97	1,01
18/10	5,8	20,32	0,28	1,5	0,259	1,460	0,80	1,04	0,33	0,14
27/10	15,8	40,64	0,39	12,9	0,816	9,210	3,05	34,19	6,81	4,90
30/10	29,5	30,48	0,98	13,2	0,446	3,770	4,54	19,30	4,65	2,58

Tabela 5.4 - Registros Individuais de Chuva, Escoamento Superficial e Taxa de Erosão Medida e Calculada Durante 1972/73 ($S_0 = 0,146$)

Data	h (mm)	I _m (mm/h)	t _o (h)	q (mm)	f = q/h	q* (m ³ /s/m ²) x 10 ⁻⁶	Taxa de Erosão (ton/ha)			
							Medida (Lal, 1975).	Equa ção 4.20	Equa ção 4.34	Equa ção 4.49
1972										
30/04	10,8	40,64	0,26	0,3	0,028	0,316	0,03	0,29	0,08	0,03
04/05	20,0	30,48	0,66	0,3	0,015	0,127	0,04	0,17	0,05	0,01
08/05	13,3	18,29	0,73	0,5	0,037	0,188	0,04	0,36	0,10	0,03
11/05	12,7	15,24	0,83	0,4	0,031	0,131	0,00	0,23	0,07	0,02
14/05	13,3	20,32	0,65	1,2	0,090	0,508	0,11	1,53	0,39	0,14
27/05	5,1	18,29	0,28	0,3	0,059	0,300	0,00	0,29	0,08	0,02
29/05	10,8	20,32	0,53	1,9	0,176	0,993	1,73	3,61	0,85	0,38
31/05	10,8	25,40	0,42	0,6	0,055	0,388	0,18	0,65	0,17	0,06
02/06	5,1	15,24	0,33	0,6	0,117	0,495	0,94	0,75	0,19	0,07
04/06	9,5	20,32	0,47	1,2	0,126	0,711	2,49	1,89	0,46	0,19
07/06	9,4	15,24	0,62	0,9	0,096	0,406	1,34	1,03	0,27	0,09
09/06	10,8	27,43	0,39	2,1	0,194	1,480	3,20	5,00	1,12	0,56
16/06	11,4	25,40	0,45	0,3	0,026	0,183	3,83	0,21	0,06	0,02
20/06	10,9	15,24	0,71	0,3	0,027	0,114	0,68	0,16	0,05	0,01
23/06	6,9	15,24	0,45	1,8	0,261	1,100	2,35	3,61	0,84	0,39
28/06	7,6	25,40	0,30	0,7	0,092	0,649	1,03	1,04	0,26	0,10
03/07	15,2	45,72	0,33	7,0	0,460	5,840	5,10	37,17	7,03	5,27
04/07	8,3	25,40	0,32	3,6	0,434	3,060	5,00	12,96	2,66	1,65
17/07	8,9	15,24	0,58	1,0	0,112	0,474	0,36	1,23	0,32	0,11
07/09	12,7	26,41	0,48	1,4	0,110	0,807	0,39	2,36	0,57	0,24
08/09	11,4	15,24	0,75	0,4	0,035	0,148	0,00	0,25	0,08	0,02
16/09	12,4	25,40	0,49	0,5	0,040	0,282	0,55	0,46	0,13	0,04
21/09	30,5	50,80	0,60	11,0	0,360	5,080	6,03	54,20	10,43	7,50
25/09	13,3	25,40	0,52	1,6	0,120	0,847	1,89	2,76	0,66	0,28
26/09	10,9	12,70	0,86	1,6	0,147	0,519	1,79	2,10	0,54	0,20
03/10	12,7	15,24	0,83	0,5	0,039	0,165	0,14	0,33	0,10	0,03
1973										
17/02	8,9	25,40	0,35	0,2	0,022	0,155	0,00	0,13	0,04	0,01
25/03	10,4	15,24	0,68	0,7	0,067	0,284	0,00	0,64	0,18	0,05
04/04	34,0	35,56	0,96	1,5	0,044	0,435	0,96	1,77	0,46	0,16
25/04	4,1	16,26	0,25	0,3	0,073	0,330	0,32	0,30	0,08	0,03
27/04	24,5	35,56	0,69	9,0	0,367	3,620	8,34	36,45	7,32	4,77
06/05	16,5	20,32	0,81	5,7	0,345	1,950	3,91	16,07	3,49	1,90
24/05	17,0	30,48	0,56	2,8	0,165	1,400	1,79	6,58	1,49	0,73
31/05	13,5	45,72	0,29	6,3	0,467	5,930	4,99	33,46	6,32	4,75
05/06	19,1	35,56	0,54	9,6	0,503	4,970	6,76	47,12	9,09	6,50
08/06	7,6	20,32	0,37	0,3	0,039	0,220	0,20	0,23	0,07	0,02
13/06	22,9	30,48	0,75	10,3	0,450	3,810	8,77	42,96	8,57	5,67
21/06	6,9	15,24	0,45	0,2	0,029	0,123	0,13	0,11	0,03	0,01
25/06	5,3	10,16	0,52	0,7	0,132	0,373	0,69	0,75	0,20	0,07
02/07	25,4	25,40	1,00	16,9	0,665	4,690	5,48	79,60	15,47	10,87
05/07	14,5	25,40	0,57	2,8	0,193	1,360	1,81	6,39	1,45	0,71
27/07	11,4	15,24	0,75	0,3	0,026	0,110	0,00	0,16	0,05	0,01
01/08	9,4	10,16	0,92	1,8	0,191	0,539	0,36	2,38	0,61	0,23
03/10	11,2	15,24	0,73	6,3	0,562	2,380	2,56	19,86	4,20	2,42
13/10	18,2	30,48	0,60	8,3	0,456	3,860	1,51	35,09	6,99	4,64
18/10	5,8	20,32	0,28	1,1	0,190	1,070	0,34	2,15	0,50	0,23
27/10	15,8	40,64	0,39	1,6	0,101	1,140	4,13	3,31	0,77	0,36
30/10	29,5	30,48	0,98	8,9	0,302	2,560	5,31	29,92	6,27	3,69

CAPÍTULO VI

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1. Aspectos Gerais

Grandes dificuldades têm sido encontradas na avaliação quantitativa da erosão e produção de sedimentos nas bacias hidrográficas. Tal fato decorre em parte pela falta de registros confiáveis que reflète o baixo desenvolvimento obtido na fabricação e manipulação de instrumentos de medição, bem como, pela complexidade do próprio processo erosivo que envolve grande número de variáveis interdependentes caracterizando um fenômeno bastante difícil de ser retratado analiticamente, sem restrições. Pretendendo somar subsídios ao estudo da erosão e produção de sedimentos pelas chuvas, o presente trabalho desenvolveu equações teóricas gerais para estimar taxas de erosão, a partir de fórmulas utilizadas para o cálculo da carga do leito nos cursos d'água. Entretanto, a derivação dessas equações com base nos princípios fundamentais nem sempre garante ótimos resultados, particularmente em virtude das muitas suposições inerentes ao desenvolvimento. A grande parte do mecanismo fundamental envolvido no movimento dos sedimentos no leito dos rios, foi bem definida pelos trabalhos de Straub, Gilbert, Meyer-Peter e Schoklitsch. A função carga do leito de Einstein (Raudkivi, 1967) que combina fatores conhecidos de escoamento em canais, variação de diâmetro dos sedimentos, e forma do leito, é, indubitavelmente, o método mais sofisticado disponível no cálculo da carga total de sedimentos. Todas as fórmulas disponíveis no entanto, ca

recem de verificação no campo e, infelizmente, diferem bastante quando comparadas entre si. Embora numerosas investigações tenham registrado técnicas para calcular o volume de material sólido transportado nos cursos d'água, um julgamento próprio do engenheiro é necessário para combinar os métodos teóricos e os procedimentos empíricos na solução de um problema particular.

6.2. A Seleção das Fórmulas de Carga do Leito

Entre as muitas fórmulas disponíveis, escolheu-se as fórmulas de Shields, Kalinske-Brown, e Einstein-Brown (Vanoni, 1975), pela simplicidade que apresentam nas suas formulações, bem como, pela facilidade com que podem ser aplicadas. As fórmulas apresentadas foram desenvolvidas para descarga sólida do leito, sob condições de fluxo permanente e uniforme. Além disso, as hipóteses formuladas por ocasião do desenvolvimento destas fórmulas, também fazem parte do desenvolvimento geral das equações de erosão. Este aspecto limita a obtenção dos resultados das equações, que podem dar respostas satisfatórias em condições diferentes, do mesmo modo que as fórmulas de carga do leito. A priori não existe uma fórmula melhor que outra.

A partir da fórmula de Shields, desenvolveu-se uma equação de erosão que entre outros aspectos, estabelece condições críticas para as quais a erosão se inicia (Eq. 4.20). Na aplicação desta equação, a ocorrência ou não de erosão poderá ser evidenciada pelo sinal de " E_s " na equação. A ocorrência do "sinal negativo" significa que a tensão de cisalhamento exercida pelo fluxo é inferior à tensão necessária para iniciar o transporte dos sedimentos nas condições dadas. Assim, em qualquer circunstância onde $E_s < 0$, pode-se concluir que as condições críticas determinantes do início do movimento dos sedimentos não são estabelecidas, de tal modo que não ocorre erosão.

Com base na fórmula de transporte de sedimentos de Kalinske (Raudkivi, 1967), uma outra equação geral de erosão foi desenvolvida (Eq. 4.34). Ressalta-se nesta equação a necessidade de melhor se avaliar os parâmetros a_s e p para condições de superfícies rugosas. A equação (4.34), ao contrário da equação (4.20), elimina qualquer força trativa crítica ou seja, admite que a erosão inicia-se para $x = 0$ (onde x representa a posição de um dado ponto na declividade em relação ao topo dessa declividade). No entanto, tal suposição têm sido feita por outros autores em estudos desta natureza (Foster et al., 1968; Foster e Meyer, 1972b). Finalmente, a partir de uma fórmula de Einstein, obteve-se uma terceira equação geral de erosão (Eq. 4.49). Nesta equação, a limitação principal ficou por conta dos parâmetros a e b da

função $\Phi = a(1/\psi)^b$, que na falta de experimentação foram admitidos como sendo 40,0 e 3,0 respectivamente. Estes valores são válidos quando $1/\psi > 0,09$ para canais com leitos erodíveis, o que não se pode afirmar para superfícies rugosas de erosão, cujas características são bastante diferentes das dos leitos fluviais. Portanto, estes parâmetros devem ser avaliados para estas novas condições.

6.3. A Expressão para a Tensão de Cisalhamento (τ_o)

Para condições de fluxo permanente e uniforme em um canal bastante largo, a força trativa ou tensão de cisalhamento no leito do canal, é expressa pela relação $\tau_o = \gamma y S_f$, onde γ é o peso específico da água; y é a profundidade do fluxo; e S_f é a declividade da linha de energia. No caso do escoamento superficial sobre superfícies rugosas de erosão, torna-se bastante difícil a avaliação de τ_o por esta expressão, dado a condição espacialmente variada do fluxo superficial perturbado pela chuva. O mecanismo de resistência ao fluxo no escoamento superficial é diferente do verificado nos canais erodíveis, devido a influência da chuva. Shen e Li (1973) estabeleceram a variação do fator de atrito e mediram diretamente a profundidade do fluxo e a tensão de cisalhamento, para diferentes condições de fluxo com chuva, utilizando a análise estatística dos dados experimentais. Um procedimento bastante simples para estimar estes parâmetros do fluxo sobre superfícies lisas, foi auspiciosamente desenvolvido por eles. Partindo da suposição que $S_f \equiv S_o$, eles obtiveram a equação (4.4). As comparações entre os valores previstos pela equação (4.4) e os valores medidos por Yoon (1970) e Li (1972) para fluxo sobre superfícies lisas, mostraram bons resultados com desvios em torno de $\pm 10\%$. Com relação a aproximação $S_f \equiv S_o$, os resultados experimentais de Yoon (1970) e Li (1972), mostraram que S_f é geralmente menor que S_o de tal modo que os valores previstos pela equação (4.4) apresentaram-se geralmente, maiores que os valores medidos, o que torna esta expressão satisfatória em termos de previsão. Quanto ao fator k que descreve o fator de atrito da fórmula de Darcy-Weisbach, Li et. al (1973) obtiveram o valor $k = 0,25$ para superfícies lisas no entanto, Komura (1976) com base na avaliação dos fatores de atrito em canais com superfícies rugosas, admite que o valor de k pode ser 0,60 para superfícies rugosas de erosão.

6.4. A Declividade Crítica (S_c)

Em analogia com a equação (4.4), desenvolveu-se uma equação simi -

lar para tensão crítica de cisalhamento (Eq. 4.5). Esta equação, evidencia, na fórmula de Shields uma nova variável, a declividade crítica que foi definida por Meyer e Monke (1965) como a declividade para a qual, sob dadas condições de fluxo, natureza do solo e cobertura do terreno, a erosão torna-se apreciável. Usando-se o critério de Shields (Raudkivi, 1967), obteve-se a equação (4.11) que permite calcular a declividade crítica em função das características granulométricas da superfície de erosão; da taxa de chuva que se transforma em escoamento superficial; e, do comprimento da declividade considerada. Assim, através da equação (4.11), pode-se estabelecer limites para os quais, sob determinadas condições, poderá ocorrer erosão. Quando a declividade do terreno, S_0 é "menor que a declividade crítica", S_c a taxa de erosão será nula. Ou seja, $E_s = 0$, quando $S_0 < S_c$. Para $S_0 > S_c$, haverá erosão, e as taxas de erosão deverão aumentar com o grau da declividade do terreno. Por outro lado, para uma dada declividade, pode-se determinar as características da chuva (frequência - intensidade - duração) capaz de causar erosão.

6.5. Os Coeficientes de Cobertura Vegetal (C_v) e Erodibilidade (C_e)

No desenvolvimento das equações teóricas de erosão, admitiu-se inicialmente que a camada superficial do solo era relativamente solta, ou seja, que as partículas do solo achavam-se prontamente disponíveis para transporte tal qual a suposição feita para as fórmulas de carga do leito. Na obtenção das equações finais de erosão, introduziu-se dois coeficientes empíricos: um relativo à cobertura vegetal; e outro à erodibilidade do solo.

6.5.1. O Fator de Cobertura

O fator de cobertura é definido simplesmente como a relação entre a área sem vegetação e a área total sujeita a erosão, tal que, C_v varia entre zero e um. Esta simplificação é admitida neste trabalho em função dos dados disponíveis pelo autor. Na realidade, a avaliação de C_v , carece de estudo pormenorizado uma vez que este fator deve variar em função da natureza da vegetação (nativa ou cultivada), idade, grau de crescimento, densidade das folhas e troncos, tamanho e número de folhas por planta, estado de conservação, etc...

6.5.2. O Coeficiente de Erodibilidade

Como no caso anterior, a simplificação na avaliação deste coeficiente, é função dos dados disponíveis. No entanto, a avaliação de C_e é bastante complexa e carece de estudos. Naturalmente, a susceptibilidade ou resposta do solo à ação desgastadora dos agentes erosivos, é o reflexo de uma série de fatores intrínsecos e extrínsecos ao solo, de difícil avaliação. Pode-se dizer que a erodibilidade do solo é o produto da ação conjunta de dois elementos conjugados em um mesmo fator: a erosividade do solo, e a erosividade da chuva, tal que:

$$C_e = [e_s \times e_c] \quad (6.1)$$

A erosividade de uma chuva é função da sua quantidade, intensidade e duração, além do seu padrão de distribuição no tempo (para um dado ponto) e no espaço (para diferentes pontos na área coberta pela chuva); bem como da época do ano em que ocorre. Por outro lado, a erosividade do solo depende, entre outros fatores, da estrutura, estratificação, permeabilidade, teor de umidade, textura, teor de matéria orgânica, compactação e composição mecânica do solo. Os sedimentos compostos de materiais de fina granulação, ou contendo frações significantes desses materiais, tais como silte e argila, apresentam maior resistência ao desprendimento que os sedimentos de maior dimensão, tais como as areias. A razão desses sedimentos finos apresentarem velocidades críticas tão altas atribui-se possivelmente à coesão que atua juntamente com o peso dos sedimentos para impedir o embarque. O comportamento dos sedimentos finos quando atacados pelo fluxo, é bastante complexo e depende de muitos fatores, incluindo relações eletromecânicas entre as partículas do solo. Poucos estudos foram desenvolvidos com relação a este problema, e o conhecimento desta fase da sedimentação encontra-se ainda em estado primitivo.

6.6. A Forma da Declividade

Um terceiro fator poderia ser introduzido nas equações finais de erosão. Trata-se do fator de forma, k_f , que deveria tomar em conta a influência das formas das declividades nas taxas de erosão e produção de sedimentos. Infelizmente, não é fácil padronizar e quantificar todas as formas de declividade encontradas no campo e determinar o efeito desta variável sobre a erosão. Assim, as equações de erosão desenvolvidas até o momento, continuam sendo usadas indistintamente para diversas formas de declividades.

6.7. Comparação dos Valores Calculados pelas Equações de Erosão

A partir dos dados citados no capítulo anterior, as taxas de erosão foram calculadas pelas equações (4.20), (4.34) e (4.49), e comparadas com as observações de campo (Lal, 1975): Para um mesmo conjunto de condições, verificou-se em geral, que os valores previstos pela equação (4.20) superam em magnitude os valores previstos pelas equações (4.34) e (4.49), sendo que a equação (4.49) em particular, apresenta as menores estimativas. Esta tendência mostrou-se mais acentuada para as declividades maiores (8,7% e 14,6%), onde os valores previstos pela equação (4.20) superam, em geral, os valores observados no campo. Considerando o conjunto total dos dados analisados, cerca de 72% das observações de campo ficaram incluídas entre os valores estimados pela equação (4.20) e, os valores estimados pela equação (4.49). Com respeito à qualidade das estimativas de cada equação em particular, uma análise estatística do erro padrão da estimativa (e_p), pode determinar com base na comparação entre os valores previstos (estimados) e os observados, qual das três equações é mais adequada. Usando-se o erro padrão da estimativa de cada equação, pode-se avaliar o grau de dispersão (disparidade) entre os valores reais (observados) e os valores estimados pelas equações. Quanto menor o erro padrão da estimativa, mais eficientemente os valores estimados concordam com os valores observados, aumentando o nível de confiança da estimativa. A tabela 6.1, mostra o erro padrão da estimativa (e_p) para as equações de erosão, bem como, o número de ocorrências verificado dentro de cada intervalo $E_s \pm e_p$, para as diferentes declividades. Como se pode notar, a equação (4.34) é a que em termos gerais, apresentou relativamente os menores erros padrões das estimativas para os dados de Lal (1975), sendo também a equação que agrupou maior número de observações dentro do intervalo $E_s \pm e_p$, com mais de 80% dos valores observados para todas as declividades testadas. Assim sendo, embora o reduzido número de dados dificulte a análise dos resultados e impossibilite um melhor julgamento, considera-se, dentro das limitações e condições vigentes, a equação (4.34) como a mais promissora na previsão das taxas de erosão.

Tabela 6.1 - Erro Padrão da Estimativa (e_p) para as equações de erosão e, número de observações no intervalo $E_s \pm e_p$ para as diferentes declividades.

Declividade (S_o)	Equação de Erosão	Erro Padrao da Estimativa(e_p) *	Intervalo $E_s \pm e_p$	Nº de Observações no Intervalo $E_s \pm e_p$ (%)
0,011	Eq. 4.20	0,13	$E_s \pm 0,13$	80
	Eq. 4.34	0,11	$E_s \pm 0,11$	80
	Eq. 4.49	0,14	$E_s \pm 0,14$	68
0,057	Eq. 4.20	3,97	$E_s \pm 3,97$	86
	Eq. 4.34	1,59	$E_s \pm 1,59$	82
	Eq. 4.49	1,95	$E_s \pm 1,95$	80
0,087	Eq. 4.20	10,62	$E_s \pm 10,62$	92
	Eq. 4.34	1,62	$E_s \pm 1,62$	80
	Eq. 4.49	2,07	$E_s \pm 2,07$	82
0,146	Eq. 4.20	18,01	$E_s \pm 18,01$	81
	Eq. 4.34	2,11	$E_s \pm 2,11$	85
	Eq. 4.49	1,71	$E_s \pm 1,71$	77

* $e_p = \sqrt{(E_o - E_s)^2 / N}$, onde E_o = Taxa de Erosão Observada (ton/ha); E_s = Taxa de Erosão prevista (estimada), N = Número de Observações.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1. Conclusões

Como descrito por Li et al. (1973), a quantidade de sedimentos finos correada na maioria dos rios, é governada mais propriamente pela disponibilidade a montante da bacia, do que pela capacidade dos rios em transportá-la. Assim sendo, a estimativa das perdas de solo a montante das bacias hidrográficas, ganha importância notável nos projetos de conservação, controle e utilização dos recursos hídricos, como elemento indicador da real grandeza do volume de materiais sólidos conduzido em suspensão nos cursos d'água. A perda de solo nas bacias se deve a ação isolada ou combinada da: i) erosão por embate das gotas de chuva; ii) erosão laminar pelo escoamento superficial; iii) erosão em pequenos córregos e/ou sulcos profundos, e iv) deslizamentos maciços de terra. Para uma bacia relativamente estável, a principal fonte de liberação de sedimentos finos para a rede de drenagem, resulta da ação conjunta do embate das gotas de chuva, da erosão laminar e, da erosão nos pequenos córregos. Estes três tipos de erosão podem, segundo Li et al. (1973), ser conceitualmente combinados no que se pode denominar de erosão pelo escoamento superficial, razão pela qual o mecanismo da erosão pelo fluxo foi o objetivo principal deste estudo, cuja análise fornece as seguintes conclusões:

- a) Ao contrário do procedimento empírico comumente adotado, equações gerais de erosão podem ser obtidas a partir de fórmulas de carga do leito para sedimento fluviais, mediante um procedimento analítico que combina princípios básicos de hidráulica, sedimentologia e mecanismos da erosão.
- b) A comparação entre valores calculados e registros de erosão previamente publicados, comprova a utilidade das equações desenvolvidas e, a adequação das fórmulas de carga do leito utilizadas para tal fim.
- c) Embora as equações de erosão tenham sido desenvolvidas com base nos princípios fundamentais, as hipóteses e limitações inerentes ao desenvolvimento das mesmas, faz com que as equações, independentemente, possam dar respostas satisfatórias em condições diferentes. A priori não existe uma equação melhor que outra.
- d) Dentro das limitações impostas pela falta de maior e mais pormenorizado número de informações, a avaliação do erro padrão da estimativa das equações de erosão apresentadas, mostrou a equação (4.34) como a mais adequada na previsão das taxas de erosão.

7.2. Recomendações

As fórmulas atualmente disponíveis em sedimentologia, foram na sua maioria desenvolvidas sob condições experimentais de laboratório, e portanto, carecem de comprovação no campo, o que justifica a necessidade de um grande empenhimento na aplicação e desenvolvimento de pesquisas para relacionar os resultados dos estudos conduzidos no laboratório com as condições naturais. Em face das inúmeras suposições feitas no decorrer do desenvolvimento das equações de erosão (incluindo as suposições inerentes às fórmulas de carga do leito utilizadas), bem como, dos coeficientes empíricos introduzidos, a análise deste estudo recomenda:

- a) Realizar experimentos no campo com chuva natural e artificial para comprovar a eficácia das equações de erosão para um número maior de condições. Concomitantemente, procurar desenvolver métodos mais eficientes para medir as perdas de água e solo ao longo das declividades.
- b) Avaliar para condições de superfícies rugosas, os diversos parâmetros e coeficientes utilizados nas equações de erosão, obtidos a partir de ensaios em leitos erodíveis (arenosos), cujas características diferem bastante das superfícies de erosão.

- c) Avaliar através de ensaios controlados, a influência da forma da declividade no processo de erosão e prever esta influência através do fator de forma, k_f , introduzido nas equações de erosão.
- d) Investigar a influência da cobertura vegetal nos seus diversos aspectos no processo de erosão, avaliando experimentalmente os efeitos na erosão de diferentes práticas de manejo e cultivo, para diferentes condições de solo e clima. Desenvolver igualmente, relações que possam avaliar o grau de erodibilidade (susceptibilidade a erosão) dos solos em função de suas propriedades físico-químicas e, do potencial erosivo das chuvas.
- e) Com o avanço gradativo do conhecimento das diferentes fases da sedimentação, procurar estabelecer um procedimento pelo qual as equações de erosão possam ser utilizadas na avaliação e previsão da erosão o nível de bacia, para uma ampla variedade de condições.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE, A Universal equation for predicting rainfall-erosion losses. Agricultural Research Service Rep. ARS 22-66, U.S. Dept. of Agriculture, Washington, D. C., 11p., 1961.
- ANDERSON, H. W., Relative contributions of sediment from source areas and transport processes. Proceedings of the sediment yield workshop. USDA Sedimentation Laboratory, Okford, Miss., U.S. Dept. of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-S-40, November 28-30, 1972.
- AREND, J.L., e HORTON, R.E., Some effects of rain intensity erosion and sedimentation on infiltration capacity. Jour, of Soil Sci. Soc. Amer., Vol. 7, pp. 82-89, 1942.
- BARNETT, A.P., e ROGERS, J.S., Soil physical properties related to runoff, and erosion from artificial rainfall. Amer. Soc. Agr. Eng., Vol. 9, nº 1, pp. 123-125 e 128, 1966.
- BARNETT, A.P., CARREKER, J.R., ABRUNA, F., e DOOLEY, A.E., Erodibility of selected tropical soils. Amer. Soc. Agr. Eng., Vol. 14, pp. 496-499, 1971.
- BENNETT, H.H., Elements of Soil Conservation. 2th edition, Kogakusha (Japan), McGraw Hill Book Camp., Inc., 1955.
- BENNETT, S.P., e SABOL, G.V., Investigation of sediment transport curves constructed using periodic and aperiodic samples. Proceedings of the Inter. Ass. for Hydraulic Reser. Symp. on River Mechanics, Vol. 2, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, pp. 49-61, 1973.
- BENNETT, S.P., Concepts of mathematical modeling of sediment yield. Water Resources Research, Vol. 10, nº 3, pp. 485-492, 1974.
- BERTRAND, A.R., e SOR, K., Effects of rainfall intensity on soil structure and migration of colloidall materials in soils. Soil Sci. Soc. Amer. , Vol. 26, Nº 3, pp. 297-300, 1962.
- CHOW, V.T., Handbook of Applied Hydrology. New York, N.Y., McGraw-Hill Book Comp., Inc., 1964.
- CORBEL, J., L'érosion Terrestre, étude quantitative (méthodes-techniques-resultats). Jour. Annales Géogr., Vol. 73, pp. 385-412, 1964.
- ELLISON, W.D., Soil erosion studies - Part. I. Agricultural Engineering , Vol. 28, Nº 4, pp. 145-146, 1947.

- ELWELL, H.A., e STOCKING, M.A., Parameters for estimating annual runoff and Soil loss from agricultural lands in Rhodesia. *Water Resources Research*, Vol. 11, N° 4, pp. 601-605, 1975.
- FARMER, E.E., e VAN HAVEREN, B.P., Soil erosion by overland flow and rain - drop splash on three mountain soils, U.S. Forest Service Res., Pap. INT-100, Vol. 14, 14p., 1971.
- FLAXMAN, E.M., Predicting sediment yield in western United States. *Jour. of Hydraul. Div. Amer. Soc. Civil Eng.*, Vol. 98, N° 12, pp. 2073-2085, 1972.
- FOSTER, G.R., HUGGINS, L.F., e MEYER, L.D., Simulation of overland flow on Short fields plots. *Water Resources Research*, Vol. 4, N° 6, pp. 1179-1187, 1968.
- FOSTER, G.R., e MEYER, L.D., Mathematical simulation of upland erosion using fundamental erosion mechanics. *Proceedings of the sediment Yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Miss., U.S. Dept. of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-S-40, November 28-30, 1972a.*
- FOSTER, G.R., e MEYER, L.D., A closed-form soil erosion equation for upland areas. In *Proceedings of Sedimentation Symp. to Honor Prof. H.A. Einstein, Chap 12*, edited and published by H.W. Shen, Fort Collins, Colorado, 1972b.
- FOSTER, G.R., e MEYER, L.D., Transport of soil particles by shallow flow. *Amer. Soc. Agr. Eng.*, Vol. 15, pp. 99-102, 1972c.
- FOSTER, G.R., e WISCHMEIER, W.H., Evaluating irregular slopes for soil loss prediction. *Amer. Soc. Agr. Eng.*, Vol. 17, N° 2, pp. 305-309, 1974.
- FOURNIER, F., *Climat et érosion*. Paris. Presses Universitaires de France, 1960.
- GRISSINGER, E.H., Laboratory Studies of the erodibility of cohesive soils. *Proceedings of the Mississippi Water Resources Conference, Water Resource Research Inst., State College, Miss., 1972.*
- HARROLD, L.L., Soil erosion by Water as affected by reduced tillage systems. *Proceedings of the No-Tillage Systems Symp., Ohio State Univ., Columbus :* pp. 21-29, 1972.
- HUDSON, N., *Soil Conservation*. New York, N.Y., Cornell University Press, 1971.
- JANSEN, J.M.L., e PAINTER, R.B., Predicting sediment yield from climate and topography. *Journal of Hydrology*, Vol. 21, N° 4, pp. 371-380, 1974.

- KOMURA, S., Hydraulics of slope erosion by overland flow. Jour. of Hydraul. Div. Amer. Soc. Civil Eng., Vol. 102, N° 10, pp. 1573-1586, 1976.
- LAL, R., Soil erosion problems on an alfisol in western Nigeria and their control. Ibadan, Nigeria. Institute of Tropical Agriculture. Monograph N° 1, 1975.
- LANGBEIN, W.B., e SCHUMM, S.A., Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. Amer. Geophys. Union., Vol. 39, pp. 1076-1084, 1958.
- LI, R.M., Sheet flow under simulated rainfall. M.S. Thesis submitted to the Dept. of Civil Eng., Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado, 1972.
- LI, R.M., SHEN, H.W., e SIMONS, D.B., Mechanics of soil erosion by overland flow. Proceedings of the 15 th Congress Intern. Assoc. for Hydraulic Research. Istanbul, Turkey, Vol. 1, pp. 437-446, 1973.
- LIGGETT, J.A., e WOOLHISER, D.A., Difference Solutions of the shallow Water equation. Jour. Eng. Mech. Div. Amer. Soc. Civil Eng., Vol. 93, N° 2 , pp. 39-71, 1967.
- LINSLEY, R.K., KOHLER, M.A., e PAULHUS, J.L., Applied Hydrology. New York , N.Y., McGraw-Hill Book Comp., Inc., 1949.
- LUSBY, G.C., REID, V.H., e KNIPE, O.D., Effects of grazing on the hydrology and biology of the badger wash basin in western Colorado 1953-1966. U.S. Geol. Survey Water Supply. Pap. 1532-D, 90p, 1971.
- MAZURAK, A.P., e MOSHER, P.N., Detachment of soil particles in simulated - rainfall. Soil Sci. Soc. Amer., Vol. 32, N° 5, pp. 716-719, 1968.
- MEEUWIG, R.O., Sheet erosion on inter-mountain summer ranges. U.S. Forest Serv. Research. Pap INT-85, 25p., 1970a.
- MEEUWIG, R.O., Infiltration and soil erosion as influenced by vegetation and soil in Northern Utah. Jour. of Range Manage, Vol. 23, pp. 185-188, 1970b.
- MEEUWIG, R.O., Soil stability on high-elevation rangeland in the inter - mountain area. U.S. Forest Serv. Research. Pap INT-94, 10p., 1971.
- MEYER, L.D., Mathematical relationships governing soil erosion by Water. Jour. of soil and Water conservation, Vol. 20, N° 4, 1965.
- MEYER, L.D., e MONKE, E.J., Mechanics of soil erosion by rainfall and over - land flow. Amer. Soc. Agr. Eng., Vol. 8, N° 4, pp. 572-577, 1965.
- MEYER, L.D., e WISCHMEIER, W.H., Mathematical simulation of the process of

- soil erosion by Water. Amer. Soc. Agr. Eng., Vol. 12, N° 6, pp. 754-758 , 1969.
- MEYER, L.D., Soil erosion by Water on upland areas. In River Mechanics, Vol. 2, Chap. 27, edited by H.W. Shen. Fort Collins, Colorado. 1971.
- MEYER, L.D., FOSTER, G.R., e ROMKENS, M.J.M., Sources of soil eroded by Water from upland slopes. Proceedings of the sediment Yield Workshop , USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Miss., U.S. Dept. of Agriculture , Agricultural Research Service, ARS-S-40, November 28-30, 1972.
- MILLER, C.R., Analysis of flow-duration sediment rating curve method of computing sediment yield. Technical Report of U.S. Bureau of Reclamation. Washington, D.C., 55p., 1951.
- MOLDENHAVER, W.C., e LONG, D.C., Influence of rainfall energy on soil loss and infiltration rates: I-Effect over a range of textures. Soil Sci. Soc. Amer. Vol. 28, N° 6, pp. 813-817, 1964.
- MUROTA, A., e HASHINO, M., Studies of a stochastic rainfall model and its application to sediment transportation. Technical Report of Osaka Univ., Vol. 19, pp. 231-247, 1969.
- MUSGRAVE, G.W., The quantitative evaluation of factors in Water erosion - a first approximation. Jour. of Soil and Water Conservation. Vol. 2, N° 3, pp. 133-138, 1947.
- MUTCHLER, C.K., e LARSON, C.L., Splash amounts from waterdrop impact on a smooth surface. Water Resource Research, Vol. 7, N° 1, pp. 195-200, 1971.
- MUTCHLER, C.K., e YOUNG, R.A., Soil detachment by raindrops. Proceedings of the sediment Yield Workshop, USDA sedimentation Laboratory, Oxford, Miss, U.S., Dept. of Agriculture, Agriculture Research Service, ARS-S-40 , November 28-30, 1972.
- PIEST, R.F., e SPOMER, R.G., Sheet and gully erosion in the Missouri Valley loessial region. Amer. Soc. Agr. Eng., Vol. 11, pp. 850-853, 1968.
- RAUDKIVI, A.J., Loose Boundary Hydraulics, 1 th edition, Oxford (London) , Pergamon Press, 1967.
- RENARD, K.G., e LANE, L.J., Sediment Yield as related to a stochastic model of ephemeral runoff. Proceedings of the sediment yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Miss., U.S. Dept. of Agriculture , Agricultural Research Service, ARS-S-40, November 28-30, 1972.

- RENDON-HERRERO, O., Estimation of Washload produced on certain small watersheds. Jour. of Hydraul. Div. Amer. Soc. Civil Eng., Vol. 100, n° 7, pp. 835-848, 1974.
- RENFRO, G.W., Sediment control measures and effects, southern great plains. Proceedings of the Water Resource Seminar, Great Plains Agr. Council, Lincoln - Nebr., July 24, 1972.
- ROSE, C.W., Soil detachment caused by rainfall. Jour. of Soil Science. Vol. 89 N° 1, pp. 28-36, 1960.
- ROUSE, H., Engineering Hydraulics, New York, N.Y. John Wiley e Sons, Inc., 1949.
- ROWLISON, D.L., e MARTIN, G.L., Rational model describing slope erosion. Jour. of Irrig. Drain. Div. Amer. Soc. Civil Eng., Vol. 97, N° 1, pp. 39-50, 1971.
- SHEN, H.W., e LI, R.M., Rainfall effect on sheet flow over smooth surface. Jour. of Hydraul. Div. Amer. Soc. Civil. Eng., Vol. 99, N° 5, pp. 771-792, 1973.
- SPABERRY, J.A., e BOWIE, A.J., Predicting sediment yields from complex watersheds. Amer. Soc. Agr. Eng., Vol. 12, N° 2, pp. 199-201, 1969.
- STOCKING, M.A., Relief analysis and soil erosion in Rhodesia using multi-variate techniques. Zeitschrift fur Geomorphologia, Vol. 16, N° 4, pp., 432-443, 1972.
- VANONI, V.A., Sedimentation Engineering, New York, N.Y., Amer. Soc. Civil Eng., 1975.
- WHITAKER, F.D., MOLDENHAVER, W.C., e SAXTON, K.E. Tillage and erosion research in the western corn belt. Proceedings of the Conf. on Tillage Practices for Improving Runoff Water Quality. Water Resource Institute, and Dept. of Eng. Agr., Univ. of Nebr., Lincoln (Nebr.), 1972.
- WILLIAMS, J.R., Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. Proceedings of the sediment yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Miss., U.S. Dept. of Agriculture, Agriculture Research Service, ARS-S-40, November 28-30, 1972.
- WILLIAMS, J.R., e BERNDT, H.D., Sediment yield computed with universal equation. Jour. of Hydraul. Div. Amer. Soc. Civil Eng., Vol. 98, N° 12, pp. 2087-2098, 1972.

- WILSON, L., Seasonal sediment yield patterns of U.S. rivers. *Water Resource Research*, Vol. 8, N° 6, pp. 1470-1479, 1972.
- WISCHMEIER, W.H., e SMITH, D.D., Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Amer. Geophys. Union*, Vol. 39, N° 2, pp. 285-291, 1958.
- WISCHMEIER, W.H., Cropping-management factor evaluations for a universal soil loss equation. *Jour of soil Sci. Soc. Amer.*, Vol. 24, N° 4, pp. 322-326, 1960.
- WISCHMEIER, W.H., e SMITH, D.D., Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. In *Agricultural Handbook N° 282*, Agricultural Research Service, U.S. Dept. of Agriculture. Washington, D.C, 47p., 1965.
- WISCHMEIER, W.H., e MANNERING, J.V., Relation of soil properties to its erodibility. *Soil Sci. Soc. Amer.* Vol. 33, pp. 131-137, 1969.
- WISCHMEIER, W.H., JOHNSON, C.B., e CROSS, B.V., A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Jour. of soil and Water Conservation*, Vol. 26, N° 5, pp. 189-192, 1971.
- WISCHMEIER, W.H., Estimating the soil loss equation cover and management factor for undisturbed areas. *Proceedings of the sediment yield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Miss., U.S. Dept. of Agriculture ; Agricultural Research Service, ARS-S-40, November 28-30, 1972.*
- WISCHMEIER, W.H., e MEYER, L.D., Soil erodibility on construction areas. In *soil erosion: causes and mechanisms prevention and control. Special Report N° 135, Highway Research Board, Washington, D.C., pp. 20-29, 1973.*
- WOOLHISER, D.A., e BLINCO, P.H., Watershed sediment yield - A stochastic approach. *Proceedings of the sediment yield workshop. USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Miss., U.S. Dept. of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-S-40, November 28-30, 1972.*
- WOOLHISER, D.A., e TODOROVIC, P., A Stochastic model of Sediment yield for ephemeral streams. *Proceedings of the USDA-IASPS Symp on Statistical Hydrology, U.S. Dept. of Agriculture, Miss., Publ. 1285, pp. 295-308, 1974.*
- YOON, Y.N., e WENZEL, H.G.Jr., Mechanics of sheet flow under simulated rainfall. *Jour. of Hydraul. Div. Amer. Soc. Civil Eng.*, Vol. 97, N° 9, pp. 1367-1386, 1971.