

EROSÃO DE SOLO NA REGIÃO DA ENCOSTA DO PLANALTO  
NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL;

REPRESENTATIVIDADE DOS PARÂMETROS DE CHUVA E  
INFLUÊNCIA DA ÁREA CULTIVADA, DA DECLIVIDADE  
E DO USO DO SOLO NA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

*GERALDO LOPES DA SILVEIRA (\*)*

Porto Alegre, agosto de 1982

(\*) Engenheiro Civil (UFRGS)

## AGRADECIMENTOS

Ao *Prof. MARC PIERRE BORDAS*, Diretor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da U.F.R.G.S. pela valiosa orientação e acompanhamento em todas as fases de desenvolvimento deste trabalho.

Aos *Profs. CARLOS E.M. TUCCI e FRANZ R. SEMMELMANN*, pelos oportunos esclarecimentos e sugestões.

A *Profa. NEUZA G. CRUZ*, pela colaboração na parte de estatística.

Ao *Hidrotécnico SADI FIGUEIRA DA ROSA*, pela dedicação e interesse nos trabalhos de campo e escritório.

A *JUSSARA SILVA* e demais *FUNCIONÁRIOS* da biblioteca, pela solicitude na prestação de informações.

Aos *PROFESSORES DO IPH*, pelos conhecimentos transmitidos.

Aos *FUNCIONÁRIOS DO IPH*, pela amizade demonstrada.

Ao *CNPq*, pela bolsa de estudos concedida.

A *FINEP*, pelo financiamento da pesquisa.

Ao *INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS - UFRGS*, pela oportunidade de realizar este trabalho.

EROSÃO DE SOLO NA REGIÃO DA ENCOSTA DO PLANALTO  
NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL;

REPRESENTATIVIDADE DOS PARÂMETROS DE CHUVA E IN  
FLUÊNCIA DA ÁREA CULTIVADA, DA DECLIVIDADE E DO  
USO DO SOLO NA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS \*

Autor: GERALDO LOPES DA SILVEIRA

Orientador: Prof. MARC PIERRE BORDAS

Foram empregadas informações hidrométricas e sedi-  
mentométricas relativas a três bacias hidrográficas com  
áreas próximas a  $1 \text{ km}^2$ , no vale do rio Forqueta, durante um  
ano, com 54 eventos registrados (18 em média para cada bacia),

Determinaram-se modelos estatísticos de previsão de  
sedimentos produzidos em eventos pluviosos isolados, por  
bacia, função de parâmetros de chuva e do teor de umidade do  
solo: A seguir, com os dados das três bacias em conjunto, ve-  
rificou-se a influência da declividade, da cobertura vegetal  
e da utilização do solo na variação do processo de produção.

---

\* Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Civil (Área de concentração - Recursos Hídricos e Sanea-  
mento), Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, agosto 1982.

O ajuste de 144 equações de regressão permitiram conclusões quanto a: avaliação de descarga sólida de abastecimento primária ou elementar; representatividade dos parâmetros usados nos modelos para fins de previsão da produção e identificação dos melhores resultados; influência da declividade e da área cultivada na produção de sedimentos; consequências sobre os regimes hidrológicos e sedimentológicos pela modificação das condições naturais da terra; e a importância do ciclo anual de utilização do solo no controle da erosão.

SOIL EROSION ON THE SCARP OF THE PLANALTO IN THE STATE  
OF RIO GRANDE DO SUL - BRAZIL;

STUDY OF REPRESENTATIVITY OF RAINFALL PARAMETERS,  
INFLUENCE OF SLOPE, CULTIVATED AREA AND LAND USE ON  
SEDIMENT YIELD \*

Author: *GERALDO LOPES DA SILVEIRA*

Advisor: *Prof. MARC PIERRE BORDAS*

Hydrological and sedimentological information on three small watersheds in the Forqueta River valley was used with 54 events recorded, an average of 18 events for each watershed.

Statistical models were established to forecast sediment yields of isolated rainfall events for each one of the watersheds, as a function of rainfall parameters and soil humidity. Next, using the data from all three watersheds, the influence of slope, vegetation cover and land use was studied to explain variations in sediment yields.

---

\* Thesis presented in partial fulfillment of the requirements of for a Master's Degree in Civil Eng<sup>g</sup>. (Speciality: Water Resources and Sanitary Eng<sup>g</sup>.) Institute of Hydraulic Research of the Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, august, 1982.

After fitting 144 regression equations, it was possible to reach conclusions as to: assessment of sediment discharge in primary or elementary watersheds; representativity of parameters used in models to predict sediment yield and identification of those that furnish the best results; influence of slope angle, and cultivated areas on sediment yield; consequences of change of natural land conditions on hydrology and sediment discharge; and finally the importance of land use practices employed during the agricultural year for soil erosion control.

## S U M Á R I O

	<u>Página</u>
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
LISTA DE TABELAS .....	XX
LISTA DE FIGURAS .....	XXI
LISTA DE FOTOS .....	XXIII
1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS GERAIS .....	1
1.1 - Introdução .....	2
1.2 - Objetivos gerais .....	4
2 - MODELOS DE PREVISÃO DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS ..	6
2.1 - Classificação geral dos modelos .....	7
2.1.1 - Os modelos empíricos .....	8
2.1.1.1 - A Equação Universal de Perda do Solo e suas generalizações .....	8
2.1.1.2 - Os modelos de regressão linear aplicados a regiões específicas .....	15
2.1.2 - Os modelos semi-conceituais determinísticos. ....	22
2.1.2.1 - Considerações iniciais .....	22
2.1.2.2 - Equações de transporte .....	24
2.1.2.2.1 - Equações de transporte por arraste .....	25
2.1.2.2.2 - Equações de transporte em suspensão .....	32
2.1.2.2.3 - Transporte total .....	37
2.1.2.2.4 - Alguns dos principais modelos existentes	38

	<u>Página</u>
2.2 - Síntese .....	41
2.3 - Objetivos da dissertação .....	43
3 - METODOLOGIA E INSTALAÇÕES DE PESQUISA .....	46
3.1 - Considerações iniciais .....	47
3.2 - Identificação dos parâmetros .....	48
3.2.1 - Parâmetros convencionais .....	48
3.2.2 - Parâmetros propostos .....	53
3.3 - Formulação dos modelos .....	57
3.3.1 - Modelos de previsão em função dos parâmetros representativos dos eventos pluviométricos por bacia .....	57
3.3.2 - Estudo da influência das características fí- sicas .....	60
3.4 - Comparação entre os resultados oferecidos pe- los modelos .....	63
3.4.1 - A Regressão Linear Múltipla .....	63
3.4.2 - Verificação do Modelo .....	64
3.4.2.1 - Teste de significância global do modelo ..	64
3.4.2.2 - Coeficiente de determinação múltipla .....	65
3.4.2.3 - Erro padrão da estimativa .....	67
3.4.2.4 - Comparação e escolha da melhor alternativa	67
3.5 - Instalações de Pesquisa .....	67
3.5.1 - Descrição da região base do estudo .....	67
3.5.2 - Sub-bacias pilotos consideradas .....	70
3.5.3 - Sistema e equipamentos de medição empregados	72
3.6 - Dados disponíveis .....	75

	<u>Página</u>
4 - APLICAÇÃO .....	76
4.1 - Avaliação dos parâmetros .....	80
4.2 - Resultados obtidos .....	90
4.3 - Análise dos resultados e conclusões .....	90
5 - CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES .....	109
5.1 - Conclusões finais .....	110
5.1.1 - Quanto aos parâmetros hidrológicos emprega - dos nos modelos de previsão da produção de sedimentos .....	110
5.1.2 - Quanto aos modelos de previsão — Influência das características físicas das bacias e do uso do solo .....	115
5.2 - Recomendações .....	119
5.2.1 - Quanto à metodologia .....	119
5.2.2 - Quanto à continuidade .....	120
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	123
7 - ANEXOS .....	129
7.1 - ANEXO A: Mapas e Fotos relativos à região do estudo .....	130
7.2 - ANEXO B: Figuras e Tabelas da Equação Univer- sal de Perda do Solo .....	147

## LISTA DE SÍMBOLOS

<u>Símbolo</u>	<u>Significado</u>
$\bar{a}$	distância do fundo do canal, considerada como transição da zona de transporte por arraste para o transporte em suspensão
$a, b, c, \dots$	coeficientes dos modelos de regressão
$A$	área de 1 bacia hidrográfica
$A_c$	área cultivada de 1 bacia hidrográfica
$AE$	razão entre $\bar{a}$ e $h$
$AC$	porcentagem de área cultivada de 1 bacia hidrográfica
$AF$	porcentagem de área coberta com floresta de 1 bacia hidrográfica
$A_1 \dots A_8$	constantes
$B_1 \dots B_8$	constantes

<u>Símbolo</u>	<u>Significado</u>
cj	coeficiente que indica, para um evento j qualquer, quantas unidades do parâmetro FCUj são necessários para produzir uma unidade de produção de sedimentos
C	é o fator de gerenciamento ou manejo dos cultivos da Equação Universal de Perda do Solo, E.U.P.S.
C	concentração de sedimentos
CF	fator C para área coberta com floresta
Cc	fator C para área cultivada
C $\bar{a}$	concentração de sedimentos conhecida a uma distância " $\bar{a}$ " do leito do rio
CMP	coeficiente médio de produção
dm	diâmetro característico dos sedimentos
d35, d40, d50	diâmetros característicos
ds	diâmetro médio dos sedimentos
D	declividade média de l bacia hidrográfica
Ds	diâmetro significativo dos sedimentos
DAj	é a área entre as curvas de nível j e j+1
DAc	é a área correspondente a um fator de solo específico

<u>Símbolo</u>	<u>Significado</u>
DE	duração de um evento pluvioso, em horas
DR	taxa de condução de sedimentos obtido na figura B.2
ej	energia cinética por unidade de altura d'água em MJ/ha.mm
E	é a energia cinética total do evento pluvioso em MJ/ha.mm
EP	é o erro padrão da estimativa
F	fator da fórmula de Einstein-Brow (GRAF, 1971)
Fc	relação entre a variância explicada pela regressão e a variância residual
Ftab	estatística de Snedecor
FC	fator de correção para cada sub-período de coeficiente medido de produção CMP.
FCU	fator de chuva e umidade do solo não corrigido
IFCU	fator de chuva e umidade do solo corrigido

<u>Símbolo</u>	<u>Significado</u>
$g$	aceleração da gravidade
$g_s$	descarga sólida por arraste em peso por unidade de largura do canal
$g_{ss}$	descarga sólida por suspensão em peso por unidade de largura do canal
$G_{st}$	descarga sólida total em peso por unidade de largura do canal
$\bar{G}$	parâmetro empregado pelo modelo de LI (1971)
$h$	altura da lâmina d'água sobre o canal
$h_j$	total precipitado no intervalo de tempo $j$ onde a intensidade da chuva se manteve constante, em mm
$H$	diferença de nível entre curvas de nível
$i_j$	é a intensidade da chuva em um intervalo de tempo $j$ , no qual se manteve constante, em mm/h
$I$	declividade do fundo do canal
$I_{30}$	intensidade máxima média de 30 min, em mm/h
$I_{60}$	intensidade máxima média de 60 min, em mm/h
$IP$	índice de precipitações em dias

<u>Símbolo</u>	<u>Significado</u>
IPA	Índice de precipitações anteriores em dias
K	o fator de erodibilidade do solo da E.U.P.S.
K	coeficiente de rugosidade de Strickler
K <sub>i</sub>	coeficiente de von Karman
K <sub>r</sub>	coeficiente de rugosidade de superfície
L	é o fator de comprimento da vertante da E.U.P.S.
LC <sub>j</sub>	comprimento da curva de nível de índice j
LC	comprimento total das curvas de nível interiores a uma bacia hidrográfica
m	coeficiente da fórmula de WES (LAURSEN, 1956)
n	coeficiente de rugosidade de Manning

<u>Símbolo</u>	<u>Significado</u>
p	número de variáveis explicativas dos modelos de <u>re</u> gressão
P	fator de práticas de conservação de solos da E.U.P.S
$P_L$	fator determinado em função de $(v_{ss}/U^*)$ e da rugosidade relativa
q	vazão líquida por unidade de largura do canal
$q_{cr}$	vazão líquida crítica por unidade de largura do <u>ca</u> nal
Q	vazão total
$Q'$	vazão responsável pela movimentação de sedimentos de fundo
QS	escoamento superficial ocorrido num determinado <u>in</u> tervalo de tempo
QP	vazão de pico de um determinado intervalo de tempo
QSP	produto de QS e QP
QI	vazão de base no início de um evento pluvioso

<u>Símbolo</u>	<u>Significado</u>
R	fator de energia cinética da chuva da E.U.P.S.
$R^2$	coeficiente de determinação múltipla
$\bar{R}^2$	coeficiente de determinação múltipla ajustado
S	é o fator de declividade da vertente da E.U.P.S.
\$	gradiente da linha de energia do escoamento
Ss	densidade média do material
TP	total precipitado por evento pluvioso, em mm
T30	produto do total precipitado TP pela intensidade máxima média de 30 min.
T60	produto do total precipitado TP pela intensidade máxima média de 60 min.
U	velocidade instantânea de um nível especificado
U*	velocidade de cisalhamento

<u>Símbolo</u>	<u>Significado</u>
$v$	velocidade média do escoamento
$v_{ss}$	velocidade de decantação em água parada
VPA	variação da precipitação antecedente dada na equação 3.6, para representar indiretamente o teor de umidade do solo no início dos eventos pluviosos.
$X_i$	representa a variável explicativa de índice $i$ no modelo de regressão linear múltipla
$y$	distância qualquer do leito do rio menor que $h$
$Y$	representa a produção de sedimentos na especificação dos modelos de previsão
$\hat{Y}$	representa a produção de sedimentos na estimação dos modelos de previsão
$\bar{Y}$	média dos valores observados de produção de sedimentos para uma determinada amostra
$Z$	parâmetro definido pela razão entre $v_{ss}$ e $(K.U^*)$

SímbolosSignificado

$\delta$	peso específico da água.
$\delta'$	peso específico da água com sedimentos.
$\delta_s$	peso específico de sedimentos.
$\epsilon$	coeficiente de difusão.
$\eta$	tamanho da amostra.
$\rho$	massa específica da água.
$\tau$	força tratora atuante sobre a partícula.
$\tau_c$	força tratora crítica sobre a partícula.
$\Psi$	coeficiente da fórmula de Du Boys.
$\Psi', \theta'$	agrupamentos adimensionais da fórmula de Einstein- -Brown

## LISTA DE TABELAS

<u>Tabela</u>		<u>Página</u>
3.1	Nomenclatura das sub-bacias identificadas.	71
3.2	Produção de Sedimentos - bacia A1 .....	76
3.3	Produção de Sedimentos - bacia B1 .....	77
3.4	Produção de Sedimentos - bacia A3 .....	78
4.1	Informações relativas aos eventos e avaliação dos parâmetros - bacia A1 .....	81
4.2	Informações relativas aos eventos e avaliação dos parâmetros - bacia B1 .....	82
4.3	Informações relativas aos eventos e avaliação dos parâmetros - bacia A3 .....	83
4.4	Informações relativas as bacias A1, B1 e A3 .....	84
4.5	Resultados Obtidos - bacia A1 .....	85
4.6	Resultados Obtidos - bacia B1 .....	86
4.7	Resultados Obtidos - bacia A3 .....	87
4.8	Resultados Obtidos - bacias A1, B1 e A3 ..	88
4.9	Quadro recapitulativo dos modelos e simbologia empregada .....	89
B.1	Fator C para área cultivada .....	148
B.2	Fator C para área coberta com floresta ...	149

## LISTA DE FIGURAS

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
A.1	Situação geográfica da bacia do rio Forqueta	131
A.2	Bacia hidrográfica do rio Forqueta .....	132
A.3	Solos na bacia hidrográfica do rio Forqueta.	133
A.4	Histograma: precipitação mensal x sedimentos produzidos .....	134
A.5	Localização da estrutura A1 na bacia hidrográfica do rio Forqueta .....	135
A.6	Estrutura de medições sedimentométricas da sub-bacia A1 .....	136
A.7	Sub-bacia piloto A1 .....	137
A.8	Curva de distribuição granulométrica do material de arraste, evento 3, sub-bacia A1 ....	138
A.9	Localização da estrutura B1 na bacia hidrográfica do rio Forqueta .....	140
A.10	Estrutura de medições sedimentométricas da sub-bacia B1 .....	141
A.11	Sub-bacia piloto B1 .....	142
A.12	Localização da estrutura A3 na bacia hidrográfica do rio Forqueta .....	144
A.13	Estrutura de medições sedimentométricas da sub-bacia A3 .....	145
A.14	Sub-bacia A3 .....	146

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
B.1	Nomograma de cálculo do fator de erodibilidade do solo .....	150
B.2	Curva do "Sediment Delivery Ratio" .....	151

## LISTA DE FOTOS

<u>Foto nº</u>		<u>Página</u>
1	Vista aérea da sub-bacia A1 .....	140
2	Estrutura de coleta de informações hidrométricas e sedimentométricas da sub-bacia A1	140
3	Vista aérea da sub-bacia B1 .....	143
4	Estrutura de coleta de informações hidrométricas e sedimentométricas da sub-bacia B1	143
5	Vista aérea da sub-bacia A3 .....	147
6	Estrutura de coleta de informações hidrométricas e sedimentométricas da sub-bacia A3	147

## 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS GERAIS

### 1.1 - Introdução

### 1.2 - Objetivos Gerais

## 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS GERAIS

### 1.1 - Introdução

A utilização do solo pela agricultura em zonas rurais tem provocado o desnudamento da superfície do solo de grandes áreas. O desmatamento, o preparo da terra e o plantio provocam alterações no meio natural. Normalmente, ocorrem de modo simplesmente exploratório, sem qualquer preocupação com a preservação dos recursos disponíveis.

O conseqüente impacto sobre o regime hidrológico e sedimentológico das bacias é fonte de preocupação, pelas conseqüências negativas que pode provocar. Em relação às condições naturais, uma determinada chuva provoca uma propagação mais rápida do volume escoado superficialmente, levando a picos de maior amplitude no hidrograma da onda de cheia. As épocas de estiagens, por conseguinte, ocorrem mais rapidamente, provocando períodos secos mais intensos e prolongados.

A erosão diminui o potencial de produtividade do solo. A presença de sedimentos no escoamento dos rios reduz a eficiência de obras relativas à gestão dos recursos hídricos. A preparação do solo para seu emprego pela

agricultura leva à remoção da cobertura existente. O desmatamento destas áreas altera a relação natural de evolução da superfície, levando a uma aceleração dos processos de erosão do solo.

As precipitações, pela desproteção do solo, não são mais amortecidas pela vegetação natural. O impacto da gota da chuva diretamente sobre o solo provoca a erosão. O escoamento superficial se propaga mais rapidamente, ocorrendo o aumento da capacidade de transporte de sedimentos no meio líquido até o rio.

A erosão e o transporte dos sedimentos da camada superficial do solo diminuem sua fertilidade, pela remoção do humus ali depositado. Isto a médio e longo prazo, leva a uma grande desvalorização das terras atingidas pela diminuição ou, até, extinção de seu potencial produtivo.

A integração dos sedimentos ao escoamento concentrado de rios e canais pode causar problemas principalmente por sua deposição. O transporte e a deposição dos sedimentos ocorrem ao longo do curso d'água de acordo com a vazão afluente. Afetam a operação de obras como reservatórios, barragens ou canais de navegação. O depósito de sedimentos diminui a capacidade de armazenamento dos reservatórios reduzindo sua vida útil. A deposição ao longo do curso d'água facilita o transbordamento da calha e a conseqüente inundação das zonas ribeirinhas, além de diminuir a lâmina d'água disponível

ã navegação para uma determinada vazão.

A geração de energia elétrica, o amortecimento de cheias, a regularização dos cursos e a navegação podem ser afetados pela deposição dos sedimentos nos reservatórios e nos rios, prejudicando a utilização de sistemas integrados de exploração dos recursos hídricos. Outra consequência decorrente da perda do solo é a poluição hídrica de natureza física e, principalmente, química, pela contaminação dos cursos d'água. Os sedimentos podem-se comportar como vetores de transmissão dos poluentes químicos até o curso d'água. Assim, quanto maior for a erosão do solo e a produção de sedimentos, maior quantidade daqueles poluentes serão transportados até o rio.

Portanto, uma melhor compreensão que permita uma análise não só qualitativa mas também quantitativa dos fenômenos envolvidos na produção e transporte de sedimentos, fornecerá maiores subsídios à elaboração de projetos para a gestão dos recursos hídricos de uma região. Permitirá uma maximização dos recursos disponíveis, assim como fornecerá uma base maior de conhecimentos para prever as consequências negativas decorrentes do processo de erosão do solo.

## 1.2 - Objetivos Gerais

Consistirão no desenvolvimento de uma técnica de previsão de sedimentos produzidos em pequenas bacias hidro -

gráficas rurais, verificando a influência das características das chuvas e das características físicas das bacias no fenômeno de erosão do solo e produção de sedimentos. Isto permitirá:

- avaliar a descarga sólida de abastecimento primária ou elementar que será injetada no curso d'água a partir de bacias vertentes ou de contribuições em percurso;
- verificar qual parâmetro de chuva é mais representativo para fins de previsão de sedimentos produzidos;
- avaliar a influência das características físicas da bacia na variação da produção de sedimentos;
- verificar o impacto causado nos regimes hidrológicos e sedimentológicos pelo desmatamento de áreas para fins de utilização pela agricultura;
- analisar a influência do ciclo anual de utilização do solo nos processos de erosão e produção de sedimentos;
- identificar qual ou quais as causas determinantes da produção de sedimentos, além das precipitações, para permitir um controle efetivo da erosão.

## 2 - MODELO DE PREVISÃO DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

### 2.1 - Classificação geral dos modelos

### 2.2 - Síntese

### 2.3 - Objetivos da dissertação

## 2 - MODELOS DE PREVISÃO DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

### 2.1 - Classificação geral dos modelos

Para avaliar o total de sedimentos produzidos por uma bacia hidrográfica, dentro de uma escala de tempo pré-determinada, os modelos matemáticos desenvolvidos são principalmente de dois tipos: os modelos empíricos e os modelos semi-conceituais determinísticos.

#### 2.1.1 - Os modelos empíricos

Os modelos empíricos consistem de regressões estatísticas que procuram vincular a variação da produção de sedimentos às variáveis e parâmetros que influenciem mais diretamente o desenvolvimento do processo físico. Estes modelos podem ser definidos de uma maneira mais ampla como a Equação Universal da Perda do Solo ou de uma maneira menos ampla, quando definidos especificamente para uma região a partir de dados relativos a uma bacia representativa.

### 2.1.1.1 - A Equação Universal da Perda de Solo e suas Generalizações

a) A Equação Universal de Perda de Solo (E.U.P.S) é uma equação empírica apresentada em 1961 pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos com o objetivo de estimar a perda de solo para fins de estudo de conservação dos solos cultivados nos Estados Unidos.

Esta equação foi baseada no estudo de inúmeras parcelas padrão de terreno. Cada parcela possuía 22,1 m de comprimento e declividade de 9,2%.

O resultado dos estudos destas parcelas permitiu formular a seguinte equação:

$$Y = R.K.L.S.C.P \quad (2.1)$$

onde Y é a perda de solo em unidade de peso por unidade de área, R é o fator de energia cinética da chuva, K é o fator de erodibilidade do solo, L é o fator de comprimento da vertente, S é o fator de declividade da vertente, C é o fator de manejo dos cultivos, P é o fator de práticas de conservação de solos.

O fator "R" é um índice numérico que representa o poder erosivo da energia de impacto da chuva sobre o solo desprotegido não compactado. A quantificação deste fator, deduzida pelos técnicos do Departamento de Agricultura dos E.E.U.U., engloba as características da precipitação que são a

energia cinética e a intensidade máxima em 30 minutos.

O fator "K" engloba as características intrínsecas de cada tipo de solo face à erosão conforme figura (B.1).

O fator "LS" é o fator que representa as condições topográficas da bacia vertente.

O fator "C" de gerenciamento dos cultivos depende do tipo de cobertura da bacia e da sua percentagem na área total (Tab. B.1 e B.2).

O fator "P" se refere às práticas de conservação do solo utilizadas para o cultivo, tendendo a 1 quando a declividade é grande e não há práticas de cultivo seguindo as curvas de nível nem a construção de terraços.

Esta equação, entretanto, fornece a produção bruta de sedimentos, que é a erosão total ocorrida ou o sedimento disponível a ser transportado pelo escoamento superficial.

b) Por isso, quando se quiser aplicar esta equação à bacias hidrográficas, tem-se que levar em consideração o conceito de taxa de condução de sedimentos, porque, a exemplo da água, os sedimentos sofrem efeitos de retenção e armazenamento no seu percurso.

Assim, a taxa de condução de sedimentos ou "delivery ratio" é definida por:

$$DR = \frac{\text{PRODUÇÃO EFETIVA}}{\text{PRODUÇÃO BRUTA}} \quad (2.2)$$

onde produção efetiva representa os sedimentos produzidos pela erosão que chegaram até a seção de referência da bacia e a produção bruta a erosão total ocorrida na bacia.

O Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (1961) apresenta um gráfico (Fig. B.2) para determinação da taxa de condução de sedimentos como função da área da bacia hidrográfica, a partir de dados experimentais. Estes tipos de gráficos, entretanto, são para condições particulares de características físicas das bacias, principalmente no que se refere a utilização do solo e declividades.

c) Uma aplicação desta equação foi feita por Williams e Berndt (1972) a cinco pequenas bacias hidrográficas situadas em Brushy Creek perto de Riesel, Texas, nos Estados Unidos, com áreas de 0,503; 0,701; 1,25; 4,48 e 17,71 Km<sup>2</sup>, cujas declividades médias eram, respectivamente, em porcentagem, 2.57, 2.19, 2.41, 2.10, 2.06. Todas elas eram utilizadas para agricultura.

Foram utilizados valores anuais de produção de sedimentos de um período de 8 anos (1962-1970). Os resultados apresentados conseguiram explicar 99% da variação da produ-

ção de sedimentos.

Para levar em consideração as diversificações no uso do solo e permitir que os cálculos pudessem ser realizados por computador, os parâmetros relativos a bacia hidrográfica foram calculados ponderadamente por Williams e Berndt do seguinte modo:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n K_i \times DA_i}{A} \quad (2.3)$$

onde K é o fator de erodibilidade do solo para a bacia, K<sub>i</sub> é o fator de erodibilidade para um solo individual i, A<sub>i</sub> é área de drenagem coberta por um solo individual, A é a área total de drenagem da bacia e "n" é o número de diferentes solos na bacia.

O termo L, comprimento da vertente, é calculado por

$$L = \frac{0.5 A}{LCH} \quad (2.4)$$

onde DA é a área de drenagem da bacia e LCH é o comprimento de drenagem da bacia.

O termo S, gradiente da declividade, pode ser determinado do mapa topográfico da seguinte maneira:

$$S_i = \left( \frac{H [LC_j + LC_{(j+1)}]}{2 DA_j} \right) 100\% \quad (2.5)$$

onde  $S_i$  é a declividade da área  $i$  definida pelas curvas de níveis  $j$  e  $j+1$  em %,  $H$  é a diferença de altura entre as linhas de contorno  $j$  e  $j+1$ ,  $LC_j$  é o comprimento do contorno  $j$  e  $DA_j$  é a área de drenagem entre os contornos  $j$  e  $j+1$ .

Assim, a declividade média da bacia é dada pela média ponderada das declividades de cada área compreendida entre os contornos  $j$  e  $j+1$ .

Logo:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \times DA_j}{A} \quad (2.6)$$

O fator LS, comprimento e declividade da vertente, pode ser determinado da seguinte forma, com  $L$  dado em metros, segundo Williams e Berndt (1972):

$$LS = L^{0,5} (0.0076 + 0.0053S + 0.00076S^2) \quad (2.7)$$

O fator de uso do solo, o termo  $C$ , é calculado ponderadamente para cada valor particular de  $C_i$  correspondente a área  $i$ , da seguinte forma:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times DA_c}{A}$$

sendo  $DA_c$  a área de drenagem correspondente ao fator de uso do solo  $C_i$ .

d) Apesar da grande utilização da EUPS, a determi-

nação do fator R continuava a apresentar problemas para o seu cálculo, devido ao trabalho laborioso e cansativo na sua determinação, além da necessidade de se possuir 22 anos seguidos de dados pluviométricos para obter uma boa estimativa para a média anual do fator de energia cinética da chuva. Em consequência disto, Ateshian (1974) propôs uma metodologia para o cálculo a partir de curvas de distribuição das chuvas características para uma determinada região. A duração da chuva considerada representativa para o cálculo proposta foi de 6h, que seria a média entre as alturas de chuva de 1h e 24h para uma dada localidade. Desta maneira, propôs o uso de 2 anos de dados para a análise das frequências das chuvas como sendo o tempo necessário para estimar, em uma dada bacia, a taxa anual do fator de energia cinética da chuva.

Assim, Ateshian aplicou esta metodologia para duas regiões características dos Estados Unidos, onde a região TIPO I seria representativa do Hawai e Alaska. A região TIPO II seria representativa dos Estados Unidos, Porto Rico e Ilhas Virgens. A partir da análise da frequência de chuvas para intervalos de 6h determinou as seguintes equações para estimar o fator R para as regiões:

$$\text{TIPO I: } R = 27.00TP^{2,2} \quad (2.8)$$

$$\text{TIPO II: } R = 16.55TP^{2,2} \quad (2.9)$$

onde TP é a altura máxima da chuva, em polegadas, para um intervalo de 6h durante um período de dois anos.

Os mapas anuais com as linhas de igual potencial e rosivo definidas a partir do R calculado na forma proposta pela Equação Universal de Perda de Solo e na forma proposta por Ateshian tem muita semelhança entre si.

e) Também Williams(1974) atacou o problema propondo uma nova maneira para o cálculo de R em relação a originalmente proposta por Wischmeier e Smith (1958), propondo a substituição da energia da chuva pelo fator de volume do escoamento superficial e a vazão de pico do hidrograma de cheia.

Assim, a equação universal da perda de solo tomou a seguinte forma:

$$Y = 11.8 \cdot (QS \times QP)^{0.5} \cdot K.L.S.C.P. \quad (2.10)$$

onde Y é a produção de sedimentos para uma tempestade individual em t, QS é o volume de escoamento superficial em m<sup>3</sup>, QP é pico de hidrograma de cheia em m<sup>3</sup>/s.

Os demais fatores já foram definidos anteriormente.

Para computar a produção de sedimentos, para um dado período, são considerados o volume de escoamento superficial e o pico para o dado período combinados com os valores de K, LS e P. Como o valor de C varia durante o ano, é feita uma média ponderada do seu valor, proporcional à taxa anual de erosão do solo para os períodos considerados.

Esta é uma rotina simplificada e de fácil utilização apresentando bons resultados para duas pequenas bacias de Treynes, Iowa, com 8 anos de registros de sedimentos produzidos anualmente. As duas bacias tiveram uma produção de sedimentos em torno de  $110 \text{ t/km}^2$  anualmente. Os valores previstos pela equação foram de 121 e 119 toneladas por quilômetro quadrado, por ano.

#### 2.1.1.2 - Os modelos de regressão linear aplicados à regiões específicas

Estes tipos de modelos empíricos são principalmente modelos de regressão múltipla da forma:

$$Y = B_0 + B_1 X_1 + \dots + B_n X_n \quad (2.11)$$

$$Y = B_0 \cdot X_1^{B1} \cdot X_2^{B2} \dots X_n^{Bn} \quad (2.12)$$

onde Y seria o total de sedimentos produzidos por unidade de área, explicados pelas variáveis  $X_i$ , que seriam fatores que influenciam a produção de sedimentos tais como as características das chuvas e as características físicas das bacias.

a) Flaxman (1972), considerando que as bacias variam amplamente na sua suscetibilidade à erosão, tentou determinar os fatores que mais influenciam a erosão e produção dos sedimentos numa sub-bacia, com a área variando até

50 Km<sup>2</sup>, utilizadas principalmente pela agricultura, possuindo pouca declividade. Definiu quatro variáveis que melhor pudessem identificar o fenômeno, através de uma equação da seguinte forma:

$$Y = A + B X_1 + C X_2 + D X_3 + E X_4 \quad (2.13)$$

onde  $X_1$  seria a variável do clima, definida como a razão entre a média anual de precipitação (em polegadas) e a média anual da temperatura (em graus Fahrenheit). É entendida como uma expressão indireta da resposta natural da vegetação para o clima;  $X_2$  seria a declividade ponderada da bacia em %;  $X_3$  seria a porcentagem de partículas do solo com diâmetro maior que 1mm em uma camada superficial do solo de  $5.1 \times 10^{-2}$  m. Esta variável é entendida como a resistência das partículas ao arraste e transporte.  $X_4$  seria a medida da agregação do solo através do seu pH. Solos com pH maior que sete são geralmente associados com baixa e esparsa cobertura vegetal. Como resultado disto, a matéria orgânica contida no solo é, geralmente, baixa e a capacidade de troca de cations é alta. Eles são, normalmente, pouco agregados. Em contrapartida, solos com pH menor que sete são associados com alta precipitação e uma maior cobertura vegetal. Isto leva a um grande conteúdo de matéria orgânica no solo e uma baixa capacidade de troca de cations sendo, portanto, bem agregados.

Flaxman ajustou este tipo de equação para regiões de onze estados dentro dos limites continentais dos Estados

Unidos, tais como Arizona, Califórnia, Colorado e outras. A equação assim determinada para 28 casos tem a seguinte forma:

$$\begin{aligned} \log(\hat{Y} + 100) = & 6.21301 + 2.19113 \log(X_1 + 100) + \\ & + 0.06034 \log(X_2 + 100) - 0.01644 \log(X_3 + 100) + \\ & + 0.04250 \log(X_4 + 100) \end{aligned} \quad (2.14)$$

sendo  $\hat{Y}$  a estimativa da produção em  $\text{kg}/\text{km}^2$ . O coeficiente  $R^2$  explicou 92% da variação da produção de sedimentos, demonstrando que poucos parâmetros são necessários para explicar o fenômeno em função do clima, topografia, geologia e condições do solo.

b) A erosão laminar do solo é um fator que depende unicamente do escoamento superficial do solo. Desta maneira, Adamson (1974), considerando preponderante o efeito deste tipo de erosão do solo sobre os demais, através de regressões lineares simples tentou relacionar a perda do solo com o escoamento superficial.

Para verificação de sua metodologia utilizou dados de duas bacias hidrográficas. Ambas as bacias possuem mesmas características físicas (área, declividade) e mesmo clima por estarem localizadas próximas uma da outra, diferenciando-se apenas quanto às práticas de conservação do solo: uma bacia é tratada e a outra não.

Inicialmente, foi estabelecida uma regressão li-

near relacionando o total precipitado com o seu respectivo escoamento superficial para os 22 anos de informações disponíveis. As relações encontradas foram:

bacia 1, tratada:

$$\log TP = 0.046QS - 2.38 \quad (2.15)$$

bacia 2, não-tratada:

$$\log TP = 0.024QS - 0.11 \quad (2.16)$$

onde TP é a chuva em mm, QS o escoamento superficial em mm.

O coeficiente de correlação foi 0.76, explicando 50% da variação do fenômeno.

Com o escoamento superficial determinado para os eventos, outra regressão é estabelecida para determinação da perda do solo, obtendo-se o seguinte:

$$\text{bacia 1: } \log \Upsilon = 0.81 \log QS + 0.60 \quad (2.17)$$

$$\text{bacia 2: } \log \Upsilon = 1.13 \log QS + 1.49 \quad (2.18)$$

onde  $\Upsilon$  é a perda do solo em Kg/ha QS o escoamento superficial em mm.

Foi, o coeficiente de correlação respectivamente, para bacia 1 e bacia 2, de 0.92% e 0.79%.

Estes tipos de correlação podem ser prejudicados nos seus resultados devido a dois motivos: a determinação

do escoamento superficial não ser muito precisa ou a hipótese da preponderância da erosão laminar não ser verdadeira:

O autor também tentou estabelecer uma relação linear entre o pico do hidrograma da onda de cheia e o total de sedimentos produzidos. Os pontos assim definidos indicam a inexistência de relação entre eles. Isto talvez se deva ao intervalo de tempo considerado (1 ano) ser muito grande, já que o processo depende também do número de eventos contidos no intervalo.

c) De modo geral, os tipos de parâmetros envolvidos nas equações são, geralmente, representativos do tipo de solo, declividade, manejo e práticas de conservação do solo e, principalmente, os parâmetros da chuva grandemente responsáveis pela validade dos modelos. Um breve histórico da determinação destes parâmetros representativos das chuvas para fins de utilização em modelos empíricos seria o seguinte:

1º) Wischmeier e Smith (1958) definiram o fator de energia cinética da chuva empregado pela Equação Universal da Perda do Solo.

2º) Williams (1974) definiu um parâmetro de chuva em função do volume do escoamento superficial e da vazão de pico para um dado período de retorno.

3º) Elwell e Stoking (1975) propuseram a definição dos parâmetros em função da altura de chuva relacionada com uma intensidade característica da mesma. Utilizaram 114 valores anuais de perda do solo de seis reservatórios na Rodésia. Dois tipos de modelos se ajustaram aos dados:

$$\text{modelo 1: } Y = AX + B \quad (2.19)$$

$$\text{modelo 2: } Y = AX^2 + BX + C \quad (2.20)$$

onde Y é a perda do solo em Kg/ha e X é um parâmetro de altura de chuva, em mm.

Para o modelo 1 foram empregados os totais precipitados diários maiores que 1.27 mm independentemente da intensidade, explicando, em média, 85% da variação da perda do solo. Para o modelo 2 foram considerados os totais precipitados diários maiores que 20 mm quando houvessem intensidades superiores a 25 mm/h, conseguindo-se explicar 73% da variação de Y.

4º) Harlin (1978) admitiu que a variação da precipitação durante o ano explicava melhor a produção de sedimentos que somente o total precipitado durante o ano. Para provar sua tese utilizou dados de 54 reservatórios, relatando as acumulações durante 15 anos nos Estados Unidos. A área de contribuição dessas bacias varia de 67 a 200 Km<sup>2</sup>. Comparou duas metodologias. Primeiro utilizou a metodologia proposta por Fournier (Harlin-1978) que consistia numa relação

entre a chuva e a produção de sedimentos, explicando somente 13% da produção de sedimentos. A metodologia proposta pelo autor a ser comparada para os mesmos dados, consistia numa regressão linear entre a variabilidade da precipitação e a produção de sedimentos. Os resultados conseguiram explicar 55% da produção de sedimentos.

5º) Em função das características da chuva, conforme propôs mais recentemente Canali (1981). Os parâmetros utilizados foram o total precipitado, duração da chuva, intensidade máxima horária e o índice de precipitações anteriores, associados a um parâmetro topográfico, como a declividade da bacia ou um parâmetro traduzindo o estado superficial do solo—(se com áreas cultivadas ou não). Os dados utilizados para determinação deste tipo de modelo de regressão foram obtidos de três pequenas bacias hidrográficas na região centro-leste do Estado do Rio Grande do Sul. Essas bacias possuem as mesmas características climatológicas por estarem localizadas próximas entre si. O primeiro tipo de modelo comparava duas bacias que possuíam as mesmas características físicas (declividade, principalmente) com a única diferença entre elas sendo a cobertura vegetal. A primeira era coberta totalmente de mata, enquanto que a segunda era utilizada para o cultivo. O modelo obtido foi:

$$\begin{aligned} Y = & -21.038 + 738 TP - 539 DE + 176 I60 - \\ & -925 IPA + 282 AC \end{aligned} \quad (2.21)$$

onde  $\hat{Y}$  é a produção estimada de sedimentos, em  $\text{Kg}/\text{Km}^2$ , TP o total precipitado em mm, DE a duração total da chuva, em horas,  $I_{\text{máx}}$  a intensidade de máxima horária do evento, em mm/H, IPA o Índice de precipitação anteriores ao evento, em dias, AC a área cultivada, em  $\text{Km}^2$ .

Os resultados obtidos explicam 84% da produção de sedimentos. O segundo tipo de modelo compara duas bacias semelhantes que diferem apenas quanto à sua declividade, possuindo a mesma cobertura vegetal (cultivo). O modelo obtido foi:

$$\hat{Y} = 3,445 \times 10^{-8} \cdot \text{TP}^{5,51} \cdot \text{DE}^{-0,25} \cdot \text{IPA}^{-2,18} \cdot \text{D}^{2,41} \cdot \text{I60}^{0,022} \quad (2.22)$$

onde  $\hat{Y}$ , TP, D, I60, IPA já foram definidos anteriormente e  $\bar{D}$  é a declividade média da bacia.

Os resultados assim obtidos explicaram 74% da produção de sedimentos.

## 2.1.2 - Os Modelos Semi-Conceituais Determinísticos

### 2.1.2.1 - Considerações Iniciais

Estes modelos são definidos a partir de formula-

ções matemáticas, que representam o desenvolvimento dos fenômenos físicos em uma bacia hidrográfica.

A ocorrência dos fenômenos é determinada pelos parâmetros e variáveis de um sistema, avaliados no tempo e no espaço. Desta forma, os modelos semi-conceituais determinísticos visam avaliar os efeitos das grandezas fundamentais que regem a ocorrência de um evento, através de equações baseadas em hipóteses supostas verdadeiras.

A produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica engloba dois conceitos básicos:

1º) a disponibilidade de material suscetível de ser transportado, a qual decorre dos fenômenos de erosão do solo e;

2º) a capacidade de transporte do escoamento.

Nas vertentes, o material disponível para transporte provém da erosão causada pelo impacto da chuva sobre o solo. Na calha dos rios, o material disponível para transporte é resultado da erosão das margens, do fundo e da descarga de abastecimento de montante. Da relação entre a capacidade de transporte do escoamento e da descarga de abastecimento, seja na superfície, seja na calha do rio, é que ocorrem o transporte, a permanência ou a deposição dos sedimentos.

Um modelo determinístico de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica deve considerar os sedimentos pro-

duzidos na superfície da bacia e na calha do rio. A produção de sedimentos surge quando o escoamento transporta o material a jusante da seção de referência da bacia. Caso contrário, haverá armazenamento dos sedimentos. Conhecer, pois, a capacidade de transporte do escoamento é tarefa fundamental para elaboração de um modelo semi-conceitual determinístico. Isto explica o grande número de equações já propostas.

As equações de transporte atualmente existentes, en tretanto, consideram o equilíbrio hidrodinâmico do escoamento como simplificação inicial. O escoamento transportará à sua capacidade máxima. Assim, as previsões de descarga sólida serão superiores a realidade, se o sedimento disponível ao transporte for inferior à capacidade máxima de transporte do escoamento. Neste caso, deve-se considerar o transporte total do sedimento disponível, naquele instante.

Apesar das limitações encontradas para utilização dessas equações, elas são a única ferramenta disponível a ser empregada em modelos deste tipo.

#### 2.1.2.2 - As equações de transporte

As equações existentes se referem a escoamentos concentrados em rios e canais. Atualmente existe a necessidade da verificação dessas fórmulas para prever o transporte de sedimentos no escoamento superficial em uma bacia hidro -

gráfica.

As partículas de sedimentos podem ser transportadas no escoamento superficial, ou no escoamento concentrado dos rios, por arraste ou em suspensão, conforme determinam as equações para quantificação do processo.

As equações de transporte empregadas em modelos semi-conceituais consideram os conceitos acima, conforme se mostra a seguir:

#### 2.1.2.2.1 - As equações de transporte por arraste

Muitas fórmulas aparecem na literatura preocupando-se com o transporte de sedimentos por arraste. Elas podem ser subdivididas em dois grandes grupos. O primeiro grupo leva em consideração o excesso de força tratora atuante em relação às tensões críticas para as condições dadas, e o segundo grupo leva em consideração as relações probabilísticas de atuação das forças de sustentação.

a) No primeiro grupo, (Bordas, 1973), pode-se citar as fórmulas de Du Boys (1879), Shields (1936), Schoklitsch (1930), Meyer - Peter e Müller (1948) apresentados a seguir.

Du Boys supôs que o movimento das partículas se dava em camadas com velocidade decrescente da superfície para

o interior, estabelecendo a equação:

$$g_s = \Psi \tau (\tau - \tau_c)$$

onde  $g_s$  é a descarga sólida em peso por unidade de largura do canal em  $\text{Kgf/m.s.}$ ,  $\tau_c$ , a força tratora crítica sobre a partícula ( $\text{Kgf/m}^3$ ),  $\tau$ , a força tratora atuante sobre a partícula ( $\text{Kgf/m}^3$ ),  $\Psi$  é um coeficiente obtido de gráfico, como função do diâmetro da partícula.

A fórmula é conceitualmente errada, pois sua hipótese do deslocamento das partículas em camadas não é verdadeira, tendo, portanto, apenas um valor histórico, não determinando condições para sua aplicação.

Shields (1936), levando em consideração os princípios da análise dimensional, propôs a seguinte relação:

$$g_s = 10 q I \frac{(\tau - \tau_c)}{(\rho_s - 1)^2 d_{50}}$$

onde  $q$  é a vazão líquida unitária em  $\text{m}^3/\text{s.m}$ ,  $I$  a declividade do fundo do canal,  $d_{50}$ , o diâmetro característico do material, em mm,  $\rho_s$ , a densidade do material,  $\tau$ ,  $\tau_c$  e  $g_s$ , já definidos anteriormente.

A expressão é dimensionalmente homogênea, portanto, pode ser utilizada em qualquer sistema de unidades.

Schoklitsch (1930) a partir de dados obtidos em la-

boratório e de medições efetuadas no rio Danúbio, apresentou a seguinte fórmula:

$$Q_s = 2500 I^{3/2} (q - q_{cr})$$

$$\text{sendo } q_{cr} = 0,26 (S_s - 1)^{5/3} \frac{d_{40}^{3/2}}{I^{7/6}}$$

onde  $Q_s$ ,  $I$ ,  $q$ ,  $S_s$  e  $d$  já foram definidos anteriormente.

A expressão obtida é homogênea e seu uso é recomendado para rios da Europa Central de onde vieram os dados para sua determinação. Portanto, não se deve usá-la quando o leito for de areia ou houver muito material em suspensão. Os resultados também podem ser confiáveis para diâmetros entre 0,3 m e 5,0mm em razão dos dados empregados na determinação da fórmula.

Meyer-Peter & Müller (1948) constataram que o transporte de material pela corrente líquida sofre influência da resistência oferecida pela superfície das partículas e através de equação de Strickler consideram a rugosidade de superfície e a rugosidade normalmente utilizada por Strickler, combinando-as. A equação final apresentada na sua forma de uso é a seguinte:

$$\delta \left( \frac{Q'}{Q} \right) \left( \frac{K}{K_r} \right)^{3/2} I_h = 0,047 (\delta' - \delta) d_m + 0,25 \rho^{1/3} (S_s - 1)^{2/3} g_s^{2/3}$$

sendo  $Q$  a vazão total que escoar;  $Q'$  a vazão responsável pela movimentação do material de fundo;  $\gamma$  é o peso específico da água em  $\text{Kgf/m}^3$ ,  $\gamma'$  é o peso específico da água com sedimentos em  $\text{Kgf/m}^3$ ,  $\rho$  massa específica da água, em  $\text{UTM/m}^3$ ,  $h$ , a altura d'água sobre o leito, em m,  $d_m$ , diâmetro significativo do material,  $U_*$  é a velocidade de cisalhamento, em m/s,  $K$ , a rugosidade de Strickler e  $K_r$ , a rugosidade de superfície, sendo  $I$  e  $S_s$  já definidos anteriormente.

A validade para utilização da fórmula está relacionada com as condições dos experimentos de laboratório. Quanto ao canal, as declividades variaram de 0,02 a 0,0004, e as alturas da lâmina d'água de 1 cm a 120 cm, as larguras, de 15 cm a 200 cm, as vazões, de 2 l/s e 4000 l/s. Quanto aos sedimentos, densidades de 1,5 até 4,0 e o diâmetro significativo, de 0,4 mm a 30 mm. As experiências foram realizadas com águas claras, desaconselhando-se o seu uso quando houver bastante sedimento em suspensão.

b) No segundo grupo de fórmulas que levam em consideração as relações probabilísticas de atuação das forças de sustentação, salienta-se, a fórmula de Einstein e Brown, (Graf, 1971).

Baseado em experiências de laboratório, Einstein observou o seguinte:

1) Uma contínua e intensa troca de partículas entre o material de fundo e o leito;

2) O movimento de conjunto do material de fundo é vagaroso enquanto que cada partícula se move através de rápidos saltos em várias etapas;

3) A deposição depende da probabilidade de que a força de sustentação do escoamento seja suficientemente pequena para que a partícula possa depositar-se. A erosão depende do número e tamanho das partículas e da probabilidade de que as forças de sustentação sejam suficientemente grandes para remover as partículas.

A apresentação mais comum da relação é feita através de dois agrupamentos adimensionais  $\phi'$  e  $\psi'$  chamados, respectivamente, de intensidade de transporte por arraste e intensidade do escoamento, na seguinte forma:

$$\frac{1}{\psi'} = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) d_{35}} \quad \text{e} \quad \phi' = \frac{g_s}{\gamma_s F [g(S_s - 1) d_{35}^3]^{1/2}}$$

$$\text{com } F = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36 \nu^2}{g d_{35}^3 (S_s - 1)}} - \sqrt{\frac{36 \nu^2}{g d_{35}^3 (S_s - 1)}}$$

onde  $\gamma_s$  é o peso específico do material seco em  $\text{Kgf/m}^3$ ,  $\tau_0$ , a tensão tratora sobre o fundo. Os demais termos já foram definidos anteriormente.

Esta fórmula é dimensionalmente homogênea e foi de

terminada com os dados obtidos por Gilbert e Meyer-Peter. Como as características do escoamento foram consideradas na formulação teórica do problema, a fórmula de Einstein - Brown pode ser aplicada a qualquer tipo de escoamento.

c) Laursen (1956) reapresentou as fórmulas anteriores e mais algumas em uma forma reduzida de modo que todas elas fossem função da velocidade média do escoamento " $V$ ", do coeficiente de rugosidade de Manning " $n$ ", do diâmetro característico  $D_s$ , da altura da lâmina d'água,  $h$ , das constantes B1 a B8.

Assim, as equações obtidas foram:

	Forma original	Forma reduzida
Du Boys (Straub)	$q_s = A_1 (\bar{v} - \bar{v}_c)$	$= B_1 n^4 \frac{V^4}{h^{2/3}}$
Schoklitsch (Shulits 1935)	$q_s = \frac{A_2}{D_s^{1/2}} s^{3/2} (q - q_{cr}) =$	$= B_2 \frac{n^3}{D_s^{1/2}} \frac{V^4}{h}$
Meyer-Peter & Müller(1934)	$q_s = (A_3 q^{2/3} s - A_4 D)^{3/2} =$	$B_3 n^3 \frac{V^4}{h}$
WES (1935)	$q_s = \frac{A_5}{n} (\bar{v} - \bar{v}_c)^m =$	$B_5 n^{2m-1} \frac{V^{2m}}{h^{m/3}}$

$$\text{Shields (1936)} \quad q_s = \frac{A_6}{D_s} \quad q \quad s \quad (\tau - \tau_c) =$$

$$= B_6 \frac{n^4}{D_s} \frac{v^5}{h^{2/3}}$$

$$\text{Brown-Einstein (1950)} \quad q_s = \frac{A_7}{D_s^{3/2}} \tau^3 = B_7 \frac{n^3}{D_s^{3/2}} \frac{v^6}{h}$$

$$\text{Brown-Kalinske (1950)} \quad q_s = \frac{A_8}{D_s} \tau^{5/2} = B_8 \frac{n^5}{D_s} \frac{v^5}{h^{5/6}}$$

onde  $A_1$  até  $A_8$  são constantes, e os demais termos foram definidos anteriormente.

Shen (1971) propôs duas fórmulas de transporte por arraste, em função da tensão crítica ( $\tau_c$ ) e da tensão que atua sobre a partícula ( $\tau$ ), desde que se disponha de dados para ajuste de coeficientes não estabelecendo condições de aplicação. As equações são da forma:

$$q_s = \beta_1 \tau^{\beta_2}$$

$$q_s = \beta'_1 (\tau - \tau_c)^{\beta'_2}$$

onde  $\beta_1, \beta_2, \beta'_1$  e  $\beta'_2$  são os coeficientes de ajuste.

Assim, quando os dados disponíveis são poucos ou inexistentes, a melhor estimativa da descarga sólida por arraste pode ser obtida pela fórmula de Einstein-Brown. Entre-

tanto, se a disponibilidade de dados for maior, é mais aconselhável utilizar as fórmulas propostas por Shen (1971), desde que o ajuste dos parâmetros ofereça bom resultado.

#### 2.1.2.2.2 - As equações de transporte em suspensão

As aproximações racionais se devem, principalmente a Lane & Kalinske e Einstein (Shen, 1971).

Para um escoamento bi-dimensional a descarga em suspensão para um canal é dada por:

$$g_{ss} = \int_0^h c \cdot U \cdot dy \quad (2.23)$$

onde  $c$  e  $U$  são função de  $y$  e  $g_{ss}$  é a taxa de lodo em suspensão, em peso por unidade de tempo e largura.

O valor da concentração de sedimentos pode ser obtido da equação diferencial da difusão, considerando um volume de controle arbitrário conforme propôs Frank et alii (Graf; 1971) na seguinte forma:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = E_m \nabla^2 c \quad (2.24)$$

onde  $c$  é a concentração de sedimentos,  $E_m$ , o coeficiente de difusão,  $t$ , o tempo.

Para soluções diluídas o coeficiente  $\epsilon_m$  não varia com a concentração. Desta forma  $\partial \epsilon_m / \partial C = 0$ . Considerando também uma distribuição uniforme da turbulência tem-se que  $\partial C / \partial t = 0$ , e não existindo variação da concentração longitudinalmente e transversalmente no canal, tem-se que  $\partial C / \partial x_1 = 0$  e  $\frac{\partial C}{\partial x_3} = 0$ .

Desenvolvendo a equação (2.24) e fazendo as simplificações anteriormente (acima) indicadas, chega-se à seguinte equação diferencial:

$$0 = v_{ss} C + \epsilon_s \frac{\partial C}{\partial x_2}$$

que representa a variação da concentração segundo a direção  $x_2$ , verticalmente à seção, sendo  $v_{ss}$  a velocidade de decantação das partículas.

A solução desta equação diferencial é obtida através de integração, chegando-se a

$$\frac{C}{C_{\bar{a}}} = e^{-[v_{ss}(y-a) / \epsilon_s]}$$

onde  $v_{ss}$ , já definido anteriormente,  $C_{\bar{a}}$ , uma concentração conhecida a uma distância " $\bar{a}$ " do leito do rio,  $C$ , a concentração obtida para uma distância  $y$  do leito do rio, e  $\epsilon_s$ , o coeficiente de difusão.

Supor que  $\epsilon_s$  seja constante em um canal é incorreto. A sua variação com a altura é a seguinte:

$$\epsilon_s = K_i \cdot U_* \cdot \frac{v}{h} (h - y)$$

onde  $K_i$  é o coeficiente de von Karman,  $U_*$ , a velocidade de cisalhamento do fundo,  $h$ , a altura da lâmina d'água.

O valor médio de  $\epsilon_s$  será:

$$\bar{\epsilon}_s = \frac{\int_0^h \epsilon_s dy}{h} = \frac{K_i U_*}{h^2} \int_0^h (yh - y^2) dy$$

Lane et alii (Simons & Senturk, 1976) usam a expressão anterior com  $K = 0,4$ , e a que integrando fica:

$$\bar{\epsilon}_s = \frac{1}{1,5} U_* \cdot h$$

logo:

$$\frac{c}{c_a} = e^{-\frac{15 v_{ss}}{U_*} \left( \frac{y - \bar{a}}{h} \right)}$$

Introduzindo a equação acima em 2.23 chega-se a:

$$g_{ss} = q c_a P_L e^{15 v_{ss} \bar{a} / (U_* h)}$$

onde  $P_L$  é dado em curva função de  $V_{ss}/U*$  e da rugosidade relativa sendo a vazão por unidade de largura. A integração de (2.23) é para toda altura da lâmina d'água de 0 até  $h$ .

Einstein (Graf, 1971) integrou a equação (2.23) a partir do limite " $\bar{a}$ " onde começa a suspensão. Este valor " $\bar{a}$ " é definido como a espessura da camada de lodo do fundo que é transportada por arraste. Assim, a equação fica da forma:

$$G_{ss} = \int_{\bar{a}}^h c U_* dy \quad (2.25)$$

Conforme Einstein, a concentração dos sedimentos pode ser dada por:

$$\frac{c}{c_{\bar{a}}} = \left( \frac{h - y}{y} \frac{\bar{a}}{h - \bar{a}} \right)^z \quad (2.26)$$

onde  $h$  é a altura da lâmina d'água,  $y$ , o ponto de concentração  $c$  a ser calculado, e " $\bar{a}$ ", a espessura da camada do fundo, sendo  $z$  um parâmetro dado por:

$$z = \frac{V_{ss}}{K \cdot U_*}$$

onde  $V_{ss}$ ,  $K$  e  $U_*$  já foram definidos anteriormente.

A distribuição de velocidades logarítmicas foi considerada no estudo, tendo-se então.

$$\frac{U}{U_*} = 5,75 \log \left( 30,2 \frac{y}{\Delta} \right)$$

Introduzindo a equação acima e 2.26 em 2.25 tem-se:

$$q_{ss} = \int_{\bar{a}}^h c_a \left( \frac{h-y}{y} \frac{\bar{a}}{h-\bar{a}} \right)^z 5,75 U_* \log \left( \frac{30,2y}{\Delta} \right) dy$$

Fazendo  $A_E = \frac{\bar{a}}{h}$  e rearranjando a equação anterior chega-se a:

$$q_{ss} = 11.6 c_a U_* \bar{a} \left[ 2.303 \log \left( \frac{30,2 h}{\Delta} \right) I_1 + I_2 \right]$$

onde

$$I_1 = 0.216 \frac{A_E^{z-1}}{(1-A_E)^z} \int_{A_E}^1 \left( \frac{1-y}{y} \right)^z dy$$

$$I_2 = 0.216 \frac{A_E^{z-1}}{(1-A_E)^z} \int_{A_E}^1 \left( \frac{1-y}{y} \right)^z \ln y dy$$

Einstein sugeriu que o limite inferior de integração para a equação 2.23 onde começa o transporte em suspensão no meio líquido fosse duas vezes o diâmetro significativo dos grãos e tomou este ponto como a concentração de referência " $c_a$ ", para o escoamento em rios e canais. Para o escoamento superficial, Li (1974) propôs que este limite inferior fosse uma vez o diâmetro significativo dos grãos devido à altura da lâmina d'água neste tipo de escoamento ser bem inferior à do escoamento em rios ou canais.

### 2.1.2.2.3 - Transporte total

Em função dos conceitos e formulações vistas anteriormente, o transporte total pode ser obtido pela adição das parcelas de transporte em suspensão e por arraste.

Desta forma:

$$G_{st} = g_s + g_{ss}$$

onde  $G_{st}$  é a descarga total de sedimentos,  $g_s$  a descarga de sedimentos transportados por arraste,  $g_{ss}$ , a descarga de sedimentos transportados em suspensão no meio líquido.

As avaliações de  $g_s$  e  $g_{ss}$  podem ser feitas individualmente, através da avaliação de cada parcela pelas fórmulas existentes. Observe-se que cada proposição destas fórmulas utilizam bases metodológicas diferentes entre si. Por isso, é aconselhável quando da avaliação do transporte total, que os cálculos das parcelas  $G_s$  e  $G_{ss}$  sejam feitos pelas proposições que se utilizam dos mesmos conceitos básicos e metodologia, principalmente se a disponibilidade de dados for insuficiente para a aferição dos resultados.

Existem também as avaliações feitas diretamente do transporte total sem considerar a soma das parcelas de arraste e suspensão, conforme propôs Laursen (1958).

#### 2.1.2.2.4 - Alguns dos principais modelos existentes

Pode-se citar Negev (Canali, 1981) que desenvolveu um modelo paramétrico de propagação de sedimentos acoplado ao modelo Stanford IV de propagação da água; por sua vez, Fleming (Canali, 1981) utilizou o método da onda cinemática para propagar a água e sedimentos.

Estes modelos se referem principalmente à escoamentos concentrados em rios e canais para propagação da água e sedimentos.

O modelo de Li (1974) é o que está mais diretamente envolvido no enfoque deste estudo, já que foi desenvolvido considerando a erosão laminar do solo como fator preponderante do processo, sendo o modelo apropriado para aplicação em pequenas bacias hidrográficas.

A rotina de propagação dos sedimentos foi determinada pelo uso dos seguintes procedimentos:

a) equação da continuidade para água, utilizada para propagação da água através do método da onda cinemática;

b) equação da continuidade para sedimentos, para determinar a avaliação do perfil longitudinal ao longo do tempo nas zonas superiores do canal de teste usado e deposição nas zonas inferiores;

c) equação de transporte de sedimentos utilizando

os princípios da metodologia de Einstein para determinação de transporte total de sedimentos.

Para o transporte por arraste foram utilizadas as equações propostas por Shen (1971) na seguinte forma:

$$q_s = \beta_1 \tau^{\beta_2} \quad (2.23)$$

ou

$$q_s = \beta_1' (\tau - \tau_c)^{\beta_2'} \quad (2.24)$$

onde  $q_s$  é a taxa de transporte por arraste,  $\tau$ , a tensão limite de cisalhamento,  $\tau_c$ , a tensão crítica de cisalhamento,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_1'$  e  $\beta_2'$  são constantes.

Utilizando a metodologia de Einstein e rearranjando as equações de transporte em suspensão, Li chegou a seguinte forma para o transporte total de sedimentos:

$$G_{st} = q_s \left( 1 + \frac{\bar{G}}{b_3} \right)$$

onde  $G_{st}$  é a taxa de transporte total,  $q_s$ , é a taxa de transporte por arraste,  $b_3$  uma constante,  $\bar{G}$ , um parâmetro calculado da seguinte forma:

$$\bar{G} = \frac{G^{w-1}}{(1-G)^w} \left[ \left( \frac{V}{U_*} + 2,25 \right) I_1 + 2,5 I_2 \right]$$

onde  $I_1$  e  $I_2$  são as integrais para o lodo em suspensão propostos por Einstein (Li, 1974),  $V$ , a velocidade média do escoamento para cada intervalo de tempo,  $U_*$ , a velocidade de cisalha-

mento do escoamento,  $W$ , um parâmetro função da velocidade de cisalhamento e velocidade de sedimentação em água parada das partículas, e do coeficiente de von Karman.

Para aferição do modelo foi utilizado um canal de teste com 4 pés de altura, 5 pés de largura e 15 pés de comprimento com fundo móvel de areia fina com diâmetro médio 0,35 mm e uma porosidade de 43%. As intensidades testadas foram de 1; 2,25; 2,5; 3,65 e 4,60 polegadas por hora e com declividades de 5%, 7%, 10%, 15%, 20%, 30% e 40%.

O ajuste do modelo foi realizado através da minimização da função-objetivo:

$$FO = \sum_{i=1}^n (S_o - S_c)^2$$

onde  $S_o$  é o sedimentograma de saída do canal, observado para cada evento,  $S_c$ , o sedimentograma calculado pelo modelo para cada evento,  $n$ , o número de incrementos de tempo.

Para a equação 2.24 os resultados obtidos após o ajuste tiveram um coeficiente de correlação de 0,978, com um erro padrão de estimativa de 0,306. Os coeficientes  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$  foram respectivamente, 334,0; 3,10 e 12,08. Para a equação (2.24), o coeficiente de correlação foi 0,983, com um erro padrão da estimativa de 0,271, sendo os coeficientes  $\beta'_1$ ,  $\beta'_2$  e  $\beta'_3$  respectivamente, 65,2; 2,47 e 11,96.

## 2.2 - Síntese

As informações obtidas até aqui permitem algumas conclusões que a seguir são apresentadas.

A produção de sedimentos de uma bacia hidrográfica, na sua seção de referência, é devida a dois fenômenos básicos: a produção efetiva de sedimentos das vertentes e o seu transporte em escoamento concentrado na calha do rio junto com os sedimentos provenientes da erosão das margens e do fundo do canal. Os modelos empíricos normalmente são empregados para prever os sedimentos produzidos por pequenas bacias hidrográficas, enquanto as equações de transporte são empregadas para prever quanto desta descarga de abastecimento chegará até a seção de referência de uma bacia de maior ordem.

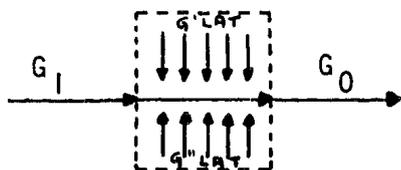
A Equação Universal de Perda de Solo se enquadra no primeiro caso e foi definida de uma forma geral de maneira que pudesse ser utilizada em outros lugares onde não se dispõe de informações que permitam o estabelecimento de uma equação particular para a região considerada. É aconselhável o uso desta equação somente em situações similares às aquelas utilizadas para sua definição ou seja, em áreas menores que  $25 \text{ Km}^2$  e declividades menores que 20%.

As equações empíricas definidas especificamente para uma região a partir de dados relativos a uma bacia representativa certamente oferecerá melhores resultados para previsão em relação aos obtidos pela Equação Universal de Perda de Solo. Estes modelos são sempre definidos em função de pa-

râmetros representativos das chuvas e de características físicas das bacias que melhor expliquem a variação da produção de sedimentos. Eles podem ser estabelecidos dentro de uma escala de tempo que melhor convenha ao estudo, e tem uso limitado à região de sua determinação, embora possam, eventualmente, ser utilizados em outras regiões desde que com características físicas bastante semelhantes às de sua definição.

Já as equações de transporte são normalmente empregadas para determinação da máxima vazão sólida que pode transportar o escoamento concentrado na calha do rio, desde que satisfeitas as condições particulares de aplicação de cada fórmula. Entretanto, estas equações de transporte podem também ser utilizadas para avaliar a produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas desde que a maior parte do sedimento produzido seja proveniente do escoamento superficial e não do escoamento na calha. A partir disto, considera-se a bacia hidrográfica como um canal muito largo onde a altura da lâmina seria a do escoamento superficial e aplica-se uma equação de transporte fazendo as adaptações necessárias.

Finalmente, pode-se dizer que um modelo geral de previsão de sedimentos produzidos para uma bacia de ordem maior deve ter o seguinte esquema:



onde  $G_1$  é a descarga de abastecimento do trecho,  $G_{LAT}$ , a descarga sólida proveniente da contribuição lateral em percurso ou das vertentes, e  $G_0$ , a descarga sólida de saída do trecho considerado, identificando-se o fenômeno de transporte de sedimentos na calha principal de  $G_1$  para  $G_0$  e o fenômeno de produção dos sedimentos nas vertentes ou em percurso através de  $G'_{LAT}$  e  $G''_{LAT}$ .

### 2.3 - Objetivos da dissertação

Este trabalho de dissertação visa primeiramente à determinação de uma equação empírica que melhor se aplique à previsão da produção de sedimentos por evento pluviométrico, em função de parâmetros representativos das chuvas e do teor de umidade do solo. A seguir são introduzidos na equação dois parâmetros — um indicativo da declividade média e outro como função do tipo de utilização do solo, para analisar suas influências no processo de produção de sedimentos.

Grande parte das equações empíricas de previsão de sedimentos produzidos encontrados na literatura se referem

a intervalos de tempo em torno de um ano. O presente estudo utiliza escalas de tempo menores para previsão, relativos a ocorrência de um evento pluvioso que proporciona resultados mais precisos com um período de tempo menor para a coleta de dados. Oferecerá também maiores informações para determinação de modelos semi-conceituais determinísticos, pois fornecerá vazões sólidas de abastecimento relativos a bacias vertentes ou devidas a contribuições em percurso recebidas ao longo do curso d'água.

Por essas razões, primeiramente é feita uma identificação dos parâmetros representativos das precipitações, utilizados com maior frequência por aquelas equações e, após, com a proposição de novos parâmetros, verifica-se quais as que se adaptam melhor a modelos de previsão da produção de sedimentos para o intervalo de tempo considerado.

As bacias experimentais tem áreas próximas a  $1 \text{ Km}^2$ , de maneira que:

- possa ser considerada a ocorrência de eventos pluviosos uniformes em toda bacia;

- as características físicas sejam semelhantes em toda sua extensão;

- tenha-se um maior controle sobre entrada de sedimentos de outras áreas;

- identifique-se rapidamente qualquer alteração na camada superficial do solo das sub-bacias;

- seja possível reter todo sedimento produzido por arraste no escoamento, assim como fazer a limpeza da estrutura de retenção dos sedimentos sem grandes dificuldades e;

- tenha-se a convicção de que a quase totalidade dos sedimentos produzidos seja proveniente da erosão laminar\* do solo, com mínima contribuição da erosão da calha.

Essas hipóteses proporcionarão um melhor controle sobre a região em estudo, permitindo:

- uma avaliação numérica mais exata dos parâmetros representativos das chuvas para os estudos de previsão dos sedimentos produzidos;

- estudar isoladamente a influência da variação das características físicas das bacias, como a declividade e área cultivada, no processo de erosão do solo.

A quantificação das produções de sedimentos dessas sub-bacias é a base fundamental para o posterior estabelecimento de modelos semi-conceituais determinísticos, por fornecerem os sedimentos provenientes das vertentes, condição inicial para saber-se o quanto deles chegará ao curso d'água principal para serem transportados pelo rio.

---

\* A erosão laminar do solo deve ser entendida como toda erosão que ocorre nas sub-bacias provocadas pelas precipitações e pelo escoamento superficial.

### 3 - METODOLOGIA E INSTALAÇÕES DE PESQUISA

3.1 - Considerações iniciais

3.2 - Definição dos parâmetros

3.3 - Formulação dos modelos

3.4 - Comparação entre os resultados gerados  
pelos modelos

3.5 - Instalações de pesquisa

### 3 - METODOLOGIA E INSTALAÇÕES DE PESQUISA

#### 3.1 - Considerações iniciais

As metodologias empregadas pelos modelos empíricos consistem basicamente na definição de parâmetros que mais influenciem a variação do processo, para posterior ajuste de uma equação de regressão linear. Primeiramente proceder-se-á à identificação dos principais parâmetros empregados na definição dessas equações, em função do que foi encontrado na literatura disponível, e à determinação da forma em que serão empregados. Também será feita a proposição e descrição de novos parâmetros a serem utilizados com os anteriores, principalmente no que se refere a um fator indicativo para teor de umidade do solo ao início de cada evento. Com isto serão definidos modelos de previsão de sedimentos produzidos para cada bacia considerada em função de parâmetros representativos dos eventos pluviométricos e umidade do solo no seu início. Os parâmetros relativos à equação de melhor ajuste serão empregados, posteriormente, para estudar a influência da declividade e da área cultivada no processo de produção de sedimentos.

### 3.2 - Definição dos parâmetros

#### 3.2.1 - Parâmetros convencionais

Inicialmente considerar-se-ão os parâmetros utilizados pela Equação Universal de Perda de Solo.

O fator  $R$  é um índice numérico que representa o poder erosivo da energia de impacto da chuva sobre o solo desprotegido e não compactado.

A quantificação deste fator deduzida pelos técnicos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (1961) engloba as características do evento pluvioso que são a energia cinética total da precipitação e a sua intensidade máxima em 30 minutos.

Neste trabalho será calculado um fator "R" para cada evento pluvioso da seguinte maneira:

$$R = \frac{E I_{30}}{10} \quad (3.1)$$

Onde  $E$  é a energia cinética total do evento, em megajoules por hectare, e  $I_{30}$  corresponde à maior intensidade ocorrida em um intervalo de 30 min durante o evento, em mm/h.

Segundo Wischmeier e Smith (1958), o valor de E é dado por:

$$E = \sum_{j=1}^n e_j * h_j \quad (3.2)$$

onde  $e_j$  representa a energia por unidade de altura d'água, em megajoules por hectare e milímetro, e  $h_j$ , a altura precipitada no intervalo  $j$ , em mm. O resultado de  $(e_j * h_j)$  representa a energia fornecida por um dos "n" intervalos do evento total onde a intensidade se manteve constante. O valor de  $e_j$  é calculado por:

$$e_j = 0.119 + 0.0873 \log_{10} i_j \quad (3.3)$$

onde  $i_j$  é a intensidade da precipitação no intervalo  $j$ , em mm/hora.

O fator K engloba as características intrínsecas de cada tipo de solo face à erosão. O Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (1961), fornece um nomograma para cálculo do fator K conforme consta na Figura (B.1). Esse nomograma será utilizado neste trabalho. O fator K é dado em ton/ha por unidade de R, ou seja, representa a parcela de solo de certas características que é erodível pela energia da chuva representada por R.

O fator LS, que representa as condições topogrâ-

ficas da bacia vertente, pode ser estimado pela seguinte expressão, segundo Williams & Berndt (1972):

$$LS = \sqrt{L} (0,0076 + 0,0053S + 0,00076S^2) \quad (3.4)$$

onde L é o comprimento de vertente representativo da bacia, em metros, e S, a declividade média da bacia, em (%).

Tomou-se como L a metade do lado menor do retângulo equivalente da bacia e o valor de S foi determinado pela seguinte expressão:

$$S = \frac{H \cdot LC}{A} * 100 \quad (3.5)$$

onde H é a diferença de altura entre as curvas de nível do mapa topográfico onde se delimitou a bacia, em metros; LC é o comprimento total do desenvolvimento das curvas de nível inscritas na bacia, medido, logicamente, no mesmo mapa topográfico, em metros, e A é a área da bacia hidrográfica em metros quadrados.

O fator C se refere a proteção do solo pela vegetação. Como este trabalho trata com eventos isolados de precipitação, o fator C para cada evento vai depender da época do ano em que ele ocorreu.

A estimativa do valor de C para cada evento será a seguinte:

$$C = \frac{C_F * AF + C_C * AC}{100}$$

onde C é o fator de gerenciamento dos cultivos, C<sub>F</sub> é o fator C para área coberta com floresta, AF é a porcentagem de área da bacia coberta com floresta, C<sub>C</sub> é o fator C para área cultivada e AC é a porcentagem de área da bacia onde há cultivo.

O valor de C<sub>C</sub> pode ser estimado pela tabela (B.1) e de C<sub>F</sub> na tabela (B.2).

O fator P se refere a práticas de conservação do solo utilizadas para o cultivo, Segundo Gottschalk (1964): *"Se não existirem práticas de conservação e o cultivo for feito em linha reta e descendente, o fator P é igual a 1. Porém, mesmo que exista alguma prática de conservação do solo, se a declividade média da bacia for maior que 24 por cento, o valor de P também tenderá a 1."*

Finalmente, para a estimativa da taxa de condução dos sedimentos foi utilizado o gráfico (Fig. B.2) fornecido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (1961) onde a taxa de condução de sedimentos em % é função da área de drenagem da bacia em milhas quadradas.

Outros parâmetros foram empregados na formulação desses tipos de modelos pelos autores abaixo relacionados.

Fournier (Harlin, 1978) considerou o total precipitado como um indicador para determinação do sedimento produzido. Aqui é considerado o parâmetro "TP", como o to-

tal precipitado por evento em mm.

Flaxman (1972) também considerou que somente a declividade média da bacia em porcentagem "D", serviria como indicador da topografia da região.

Adamson (1974) e Williams (1974) salientaram a importância da determinação do escoamento superficial como outro parâmetro importante para explicar a variação da produção de sedimentos através de modelos empíricos. Esta determinação do escoamento superficial  $Q_s$ , em mm, será feita por evento a partir de dados de precipitação, conforme método proposto por Ogrosky & Mockus (1964).

Adamson e Williams também salientaram a determinação da vazão de pico do hidrograma de cheia como um outro parâmetro importante para utilização nesses modelos.

Essas vazões  $Q_P$  serão consideradas por evento, em litros por segundo.

Também Williams (1974) observou que o produto do escoamento superficial  $Q_s$  pela vazão de pico  $Q_P$  seria um parâmetro a ser considerado. Assim empregar-se-á o parâmetro  $Q_{SP}$  em milímetros vezes metros cúbicos por segundo, por evento.

Elwell e Stoking (1975) consideram mais prática a determinação dos parâmetros de chuva em função da altura de chuva de um determinado intervalo de tempo por uma intensidade característica. Considerando a idéia dos autores definiram

-se, no presente trabalho, dois parâmetros: o T30 e o T60 que representam o total precipitado no evento, em milímetros, multiplicados, respectivamente, pelas intensidades máximas de 30 min e 60 min, em milímetros por hora.

Canali (1981) considerou os seguintes parâmetros como importantes para utilização neste tipo de modelo: o total precipitado por evento TP, em milímetros, a duração total do evento "DE", em horas, a intensidade máxima horária do evento, I60 em milímetros por hora, o índice de precipitação anterior "IPA" ao evento, em dias, além da área cultivada da bacia "Ac", em Km<sup>2</sup>, e a declividade média da bacia D, em porcentagem.

### 3.2.2 - Parâmetros propostos

A primeira etapa deste estudo requer a melhor caracterização possível da relação entre produção efetiva de sedimentos e características das chuvas. Como o intervalo de tempo utilizado é muito pequeno, cresce a importância de um parâmetro adicional indicativo do teor de umidade do solo ao início do evento, conforme proposto por Canali (1981). Isto significa, que, para uma mesma bacia, se ocorrer uma mesma precipitação (quer dizer mesma duração, total precipitado, distribuição) quando se tiver o mesmo teor de umidade do solo em ambas ocorrências, as produções efetivas de sedimentos deveriam ser muito próximas entre si para os dois eventos, o que

viria a caracterizar uma linearidade múltipla do processo.

Desta forma, será definido um parâmetro "VPA", Variação da Precipitação Antecedente, que caracterize de forma indireta o teor de umidade do solo ao início do evento, em função do momento da chuva em relação a um dia "i" antecedente a ocorrência do evento pluvioso.

Sendo  $(i - j + 1)$  igual a  $J$ , tem-se:

$$VPA(i) = \sum_{j=i}^1 TP(J) * j \quad (3.6)$$

onde  $TP(J)$  é o total precipitado no dia  $J$  antecedente ao início do evento e  $i$  representa o número de dias antecedentes ao início do evento a serem considerados. Neste trabalho serão considerados até dez dias antecedentes ao início do evento para o cálculo dos momentos.

Outra maneira utilizada para caracterizar o teor de umidade do solo é a vazão de base inicial de cada evento pluviométrico, em l/s.

Também é proposto um fator representativo das chuvas e do teor de umidade do solo na seguinte forma:

$$FCU(i) = R^2 * VPA(i) \quad (3.7)$$

onde  $FCU(i)$  é o fator de chuva e umidade do solo considerando-se as precipitações de  $i$  dias antecedentes ao evento,  $R$  é o fator de energia cinética da chuva da Equação Universal de

Perda de Solo definido em (3.1) e  $VPA(i)$  é o fator indicativo do teor de umidade do solo no início do evento pluvioso definido na equação (3.6).

O fenômeno da produção de sedimentos, conforme considerado anteriormente, depende dos parâmetros representativos das chuvas e, no caso do presente estudo, de um índice indicativo da umidade do solo ao início dos eventos.

Porém, a produção de sedimentos poderá ser diferente para uma mesma precipitação e umidade do solo desde que a apresentação da camada superficial do solo também seja diferente. Em consequência, para um determinado período de tempo, a ocorrência de um ciclo de utilização da terra pode implicar em uma influência na produção de sedimentos.

Assim, cada ciclo pode ser dividido em sub-períodos caracterizados pela pequena variação na apresentação da superfície do solo. Com a identificação destes sub-períodos é possível determinar equações particulares para representar a previsão dos sedimentos produzidos em cada situação.

No entanto, pode-se, também, estabelecer uma única equação para o período de duração total do ciclo, desde que se façam correções no fator FCU para entrar na equação geral em função dos diferentes sub-períodos de tempo considerados no ciclo de utilização do solo.

Em primeiro lugar, estabelece-se um coeficiente de produção para todos os eventos de cada sub-período verificando quantas unidades do parâmetro  $FCU(i)$  são necessárias para

prever uma unidade da produção de sedimentos.

Para o evento  $j$ , de cada sub-período, o coeficiente é dado por:

$$c_j = \frac{FCU(j)_j}{Y_j}$$

onde FCU está definido em (3.7),  $Y$  é a produção específica de sedimentos, em  $t/Km^2$ , e  $c$  é o coeficiente de produção.

Após calcula-se o coeficiente médio de produção para cada sub-período por:

$$CMP = \frac{\sum_{j=1}^n c_j}{n} \quad (3.8)$$

onde  $c_j$  é o coeficiente de produção do evento  $j$  e  $n$  o número de eventos dentro do sub-período considerado.

Definindo-se um sub-período como base, pode-se estabelecer o fator de correção do parâmetro FCU para cada um dos demais sub-períodos, da seguinte forma:

$$FC = \frac{CMPB}{CMP} \quad (3.9)$$

onde FC é o fator de correção para o sub-período de coeficiente médio de produção CMP em relação ao CMPB, coeficiente médio do sub-período tomado como base.

Assim, pode-se obter uma única equação de previsão de sedimentos produzidos para o período total do ciclo de

utilização do solo, onde são feitas as devidas correções no parâmetro FCU, quando o evento considerado não pertence ao sub-período base. Assim o FCU corrigido é:

$$FCU(i) = FCU(i) \cdot FC = R^2 \cdot VPA(i) \cdot FC \quad (3.10)$$

### 3.3 - Formulação dos Modelos

#### 3.3.1 - Modelos de Previsão em função de parâmetros representativos dos eventos pluviométricos por bacia

São formulados estes modelos a partir de parâmetros identificados na literatura e propostos neste trabalho para previsão da produção efetiva de sedimentos em eventos pluviométricos isolados. Primeiramente, é feita a aplicação da equação universal de Perda de Solo e uma versão da mesma equação proposta por Williams (1974). As demais equações de previsão propostas consistem em modelos de regressão linear múltiplos, estimados e aplicados para cada uma das bacias consideradas nos estudos.

Assim os modelos empregados são:

$$Y_1 = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \cdot DR \quad (3.11)$$

$$Y_2 = 11.8(QS \times QP)^{0,5} \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \cdot DR \quad (3.12)$$

$$Y_3 = a + bTP \quad (3.13)$$

$$Y_4 = a \cdot TP^b \quad (3.14)$$

$$Y_5 = a + T30 \cdot b \quad (3.15)$$

$$Y_6 = a \cdot T30^b \quad (3.16)$$

$$Y_7 = a + bT60 \quad (3.17)$$

$$Y_8 = a \cdot T60^b \quad (3.18)$$

$$Y_9 = a + bQS \quad (3.19)$$

$$Y_{10} = a \cdot QS^b \quad (3.20)$$

$$Y_{11} = a + bQP \quad (3.21)$$

$$Y_{12} = a \cdot QP^b \quad (3.22)$$

$$Y_{13} = a + bQSP \quad (3.23)$$

$$Y_{14} = a \cdot QSP^b \quad (3.24)$$

$$Y_{15} = a + bTP + cIP \quad (3.25)$$

$$Y_{16} = a \cdot TP^b \cdot IP^c \quad (3.26)$$

$$Y_{17} = a + bT30 + cIP \quad (3.27)$$

$$Y_{18} = a \cdot T30^b \cdot IP^c \quad (3.28)$$

$$Y_{19} = a + bT60 + cIP \quad (3.29)$$

$$Y_{20} = a \cdot T60^b \cdot IP^c \quad (3.30)$$

$$Y_{21} = a + bR + VPAL(8) \cdot c \quad (3.31)$$

$$Y_{22} = a \cdot R^b \cdot VPA(8)^c \quad (3.32)$$

$$Y_{23} = a + bR + cVPA(9) \quad (3.33)$$

$$Y_{24} = a \cdot R^b \cdot VPA(9)^c \quad (3.34)$$

$$Y_{25} = a + bR + cVPA(10) \quad (3.35)$$

$$Y_{26} = a \cdot R^b \cdot VPA(10)^c \quad (3.36)$$

$$Y_{27} = a + bR + cQI \quad (3.37)$$

$$Y_{28} = a \cdot R^b \cdot QI^c \quad (3.38)$$

$$Y_{29} = a + bTP + cDE + dI60 + c VPA(8) \quad (3.39)$$

$$Y_{30} = a \cdot TP^b \cdot DE^c \cdot I60^d \cdot VPA(8)^c \quad (3.40)$$

$$Y_{31} = a + bTP + cDE + dI60 + cVPA(9) \quad (3.41)$$

$$Y_{32} = a \cdot TP^b \cdot DE^c \cdot I60^d \cdot VPA(9)^c \quad (3.42)$$

$$Y_{33} = a + bTP + cDE + dI60 + c VPA(10) \quad (3.43)$$

$$Y_{34} = a \cdot TP^b \cdot DE^c \cdot 160^d \cdot VPA(10)^c \quad (3.44)$$

$$Y_{35} = a + bR + cIP \quad (3.45)$$

$$Y_{36} = a \cdot R^b \cdot IP^c \quad (3.46)$$

$$Y_{37} = a + b \cdot IFCU(9) \quad (3.47)$$

$$Y_{38} = a \cdot IFCU(9)^b \quad (3.48)$$

$$Y_{39} = a + b \cdot IFCU(10) \quad (3.49)$$

$$Y_{40} = a \cdot IFCU(10)^b \quad (3.50)$$

onde

$Y_i$  é a produção específica efetiva de sedimentos estimada pelo modelo  $i$ , em  $Kg/Km^2$

$R$  é o fator de energia cinética da chuva por evento da Equação Universal de Perda do Solo, E.U.P.S., dado na equação (3.1).

$K$  é o fator de erodibilidade do solo na E.U.P.S., obtido na Figura (B.1).

$L$  é o comprimento da vertente representativa da bacia, em metros.

$D$  ou  $S$  é a declividade média da bacia, em porcentagem.

$C$  é o fator de gerenciamento dos cultivos do solo da E.U.P.S. obtidos nas tabelas (B.1) e (B.2)

$P$  é o fator de práticas de conservação do solo, da E.U.P.S.

$TP$  é o total precipitado por evento, em mm.

$T_{30}$  é a intensidade máxima média de 30 min, em mm/h, multiplicado pelo total precipitado  $P$  em mm.

$T_{60}$  é a intensidade máxima média de 60 min, em mm/h, multiplicado pelo total precipitado  $TP$ , em mm.

QS é o escoamento superficial por evento, em mm do total pre  
cipitado.

QP é a vazão de pico do evento considerado, em l/s.

QSP é dado pelo produto de QP e Qs.

IP é um índice de precipitações anteriores que indica o núme  
ro de dias até ocorrer uma precipitação maior que  
10mm.

VPA é a variação da precipitação antecedente dada na equação  
(3.6), para representar indiretamente o teor de u-  
midade do solo no início do evento pluvioso em  
mm.

QI é a vazão de base no início do evento, em l/s.

DE é a duração do evento, em horas.

I60 é a intensidade máxima média ocorrida em 60 min no even-  
to.

IFCU(i) é o fator de chuva e umidade do solo considerando as  
precipitações acontecidas até i dias anteceden-  
tes ao evento, conforme definido na equação (3.10).

DR é a taxa de condução de sedimentos obtida na Fig. (B.2).

a, b, c... são constantes do modelo de regressão.

### 3.3.2 - Estudo da influência das características físicas

As características físicas a serem estudadas con-  
sistem na declividade média da bacia B e a sua porcentagem  
de área cultivada AC.

Será escolhido dentre os modelos aquele que oferecer melhor estimativa para as informações disponíveis.

Para considerar isoladamente a influência da declividade e da área cultivada no processo de produção, as demais variáveis devem ser constantes no estudo comparativo. As bacias devem ter a mesma forma e o tipo de solo, e quando estudar-se só a declividade, devem ter a mesma cobertura vegetal, assim como devem ter a mesma declividade, quando estudar-se só a influência da cobertura vegetal.

As seguintes equações consideram como única variável entre bacias as suas declividades. Desta forma:

$$Y_{41} = [aY] + t + vD \quad (3.51)$$

$$Y_{42} = [Y^a] \cdot t \cdot D^v \quad (3.52)$$

onde  $Y_i$  é a produção específica de sedimentos, em  $\text{Kg}/\text{Km}^2$ ,  $D$  a declividade média da bacia, em %,  $[Y]$  são os parâmetros relativos aos eventos pluviométricos que melhor explicaram a produção de sedimentos nas equações de previsões anteriores. Os valores  $[a]$ ,  $t$ ,  $v$  são constantes.

Os modelos  $Y_{43}$  e  $Y_{44}$ ,  $Y_{45}$  e  $Y_{46}$ ,  $Y_{47}$  e  $Y_{48}$ ,  $Y_{49}$  e  $Y_{50}$ , tem a mesma formulação de  $Y_{41}$  e  $Y_{42}$ . Entretanto os modelos  $Y_{43}$  e  $Y_{44}$  não consideram as produções de sedimentos iguais a zero,  $Y_{45}$  e  $Y_{46}$  só consideram produções acima de 100 Kg,  $Y_{47}$  e  $Y_{48}$  só consideram produções acima de 1.000 Kg, e o  $Y_{49}$  e  $Y_{50}$  só consideram produções acima de 10.000 Kg.

Para estudar a influência da cobertura vegetal entre bacias, a declividade tem de ser a mesma entre elas, assim como as demais características físicas. Os modelos formulados são os seguintes:

$$Y_{51} = [aY] + t + vAC \quad (3.53)$$

$$Y_{52} = [Y^a] \cdot t \cdot AC^v \quad (3.54)$$

onde AC é a área cultivada e os demais valores são definidos em (3.51) e (3.52).

Os modelos  $Y_{53}$  e  $Y_{54}$ ,  $Y_{55}$  e  $Y_{56}$  tem a mesma formulação de  $Y_{51}$  e  $Y_{52}$ . O  $Y_{53}$  e  $Y_{54}$  não consideram no ajuste os valores de produção iguais a zero e o  $Y_{55}$  e  $Y_{56}$  não consideram os menores que 100 Kg.

A seguir é definido um modelo mais geral onde entram bacias que diferem quanto a declividade e % da área cultivada da seguinte forma:

$$Y_{57} = [aY] + t + uD + vAC \quad (3.56)$$

$$Y_{58} = [aY] \cdot t \cdot D^u \cdot AC^v \quad (3.57)$$

onde v é constante e as demais grandezas foram definidas anteriormente.

Os modelos  $Y_{59}$  e  $Y_{60}$  e  $Y_{61}$  e  $Y_{62}$  tem a mesma formulação de  $Y_{57}$  e  $Y_{58}$ . O  $Y_{59}$  e  $Y_{60}$  não consideram valores de produção iguais a zero e o  $Y_{61}$  e  $Y_{62}$  não consideram valores de produção menores do que 100 Kg.

### 3.4 - Comparação entre os resultados gerados pelos modelos

#### 3.4.1 - A Regressão Linear Múltipla

A regressão é um modelo que procura explicar a variação de um fenômeno mensurável dependente,  $Y$ , em função da variação de outros fatores também mensuráveis independentes  $X_i$ . No estudo em questão procura-se explicar a produção efetiva específica de sedimentos em função dos diversos parâmetros selecionados anteriormente.

A primeira etapa do trabalho consiste na especificação dos modelos que são de duas formas. A primeira, mais clássica:

$$Y_i = B_0 + B_1 \cdot X_{1i} + \dots + B_j X_{ji} + E_i \quad (3.58)$$

ou, também, sob a forma:

$$Y_i = B_0 \cdot X_{1i}^{B_1} \dots X_{ji}^{B_j} + E_i \quad (3.59)$$

onde  $Y_i$  é a variável explicada,  $X_i$  a variável explicativa, que são variáveis observadas e consideradas como constantes no cálculo da esperança matemática e das derivadas parciais em relação aos parâmetros,  $B_i$  são os parâmetros do modelo teórico, coeficiente numérico não conhecido, e  $E_i$  é o termo aleatório não observado que representa o efeito de todos os fatores que não se pode identificar, sobre  $Y$ .

A seguir passa-se a etapa seguinte do trabalho que consiste na estimativa do modelo a partir da especificação i

nicial. O método de estimação dos parâmetros a ser utilizado é o dos mínimos quadrados pela simplicidade que apresenta em relação aos outros, sem, no entanto, concorrer ao empobrecimento da qualidade das estimativas, conduzindo a estimadores não tendenciosos e eficazes. O método consiste em minimizar a soma dos quadrados dos resíduos. Assim, a estimativa, para uma determinada amostra, será:

$$\hat{Y}_i = b_0 + b_1 X_{1i} + \dots + b_j X_{ji} \quad (3.60)$$

$$\hat{Y}_i = b_0 X_{1i} \dots X_{ji} \quad (3.61)$$

sendo  $\hat{Y}_i$  o valor estimado pelo modelo onde  $b_0 \dots b_j$  minimizam o somatório dos quadrados entre  $Y_i$  e  $\hat{Y}_i$ .

### 3.4.2 - Verificação do modelo

Após especificação e estimação do modelo parte-se para verificação do mesmo que pode ser através de testes estatísticos ou por análise de estudos de correlação.

#### 3.4.2.1 - Teste de significância global do modelo

O teste de hipótese a ser realizado consiste no teste F, que será efetuado a um nível de significância de 5%, valor normalmente aceito nesses tipos de estudos. Em última análise, será estudada a ligação entre a variável explicada e as variáveis explicativas.

O valor de  $F_c$  (calculado) é obtido pela relação entre a variância explicada pela regressão e a variância resi-

dual, logo:

$$F_c = \frac{\sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 / p}{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / (\eta - p - 1)} \quad (3.62)$$

onde  $\bar{Y}$  é a média dos valores observados,  $\hat{Y}_i$  é o valor estimado pela regressão múltipla para o evento  $i$ ,  $Y_i$  é o valor observado para o evento  $i$ ,  $p$  é o número de variáveis explicativas representando o número de graus de liberdade do numerador e  $(\eta - p - 1)$  do denominador, onde  $\eta$  é o tamanho da amostra.

A seguir determina-se, ao nível de significância a dotado, através de uma tabela, o valor de  $F_{tab}$ .

Se  $\hat{F}_c > F_{tab}$  significa que a contribuição do conjunto de variáveis explicativas é suficiente para explicar a variação de  $Y$  ao nível de 5%.

#### 3.4.2.2 - Coeficiente de determinação múltipla

Coeficiente de determinação múltipla define a proporção parcial da variação total explicada pela regressão na seguinte forma:

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (3.63)$$

onde  $\hat{Y}_i$  e  $\bar{Y}$  e  $Y_i$  estão definidos anteriormente.

Cabe salientar, porém, que o coeficiente  $R^2$  nada informa a respeito da precisão do cálculo dos coeficientes, e em pequenas amostras este valor tende a ser elevado enquanto que os erros padrões estimados dos coeficientes de regressão podem também serem elevados. Entretanto, pode-se levar em conta na estimativa de  $R^2$  o número dos graus de liberdade através da seguinte expressão, onde  $\bar{R}^2$  será o coeficiente de determinação ajustado.

$$\text{Logo: } \bar{R}^2 = 1 - \frac{\eta - 1}{\eta - p - 1} (1 - R^2) \quad (3.64)$$

Este coeficiente exprime o percentual da variância total explicada pelo modelo, deixando de ser um simples indicador da dispersão, o que favorece a sua utilização para a comparação entre diversas regressões de mesma variável explicada, podendo diferir entre si tanto pelo número de variáveis explicativas, como pelo tamanho da amostra.

#### 3.4.2.3 - Erro padrão da estimativa

Fornece o desvio padrão dos valores estimados pela regressão em relação aos valores observados na seguinte forma:

$$EP = \sqrt{\frac{(\hat{Y}_i - Y_i)^2}{\eta - 1}} \quad (3.65)$$

onde  $\hat{Y}_i$ ,  $Y_i$ ,  $\eta$  foram definidos anteriormente. Significa que em 90% das vezes, o valor que realmente ocorreria na natureza para um evento qualquer, vai pertencer ao intervalo de tempo determinado pelo erro padrão da estimativa e a previsão estimada pelo modelo para aquele evento. O intervalo de confiança será  $(\hat{Y}_i - EP; \hat{Y}_i + EP)$ .

#### 3.4.2.4 - Comparação e escolha da melhor alternativa

O critério de escolha dos modelos quanto à sua significância global, basear-se-á na análise dos resultados oferecidos pelos testes estatísticos,  $\bar{R}^2$ , FC e EP.

O modelo que tiver o maior FC e  $\bar{R}^2$  e menor EP em relação aos outros, apresentará uma maior significância global e, portanto, deverá ser o escolhido.

### 3.5 - Instalações de Pesquisa

#### 3.5.1 - Descrição da região base do estudo

A região base do estudo está compreendida pela bacia hidrográfica do Rio Forqueta localizada na Região Centro

-leste do Estado do Rio Grande do Sul, entre os paralelos 28°40'S e 29°30'S e pelos meridianos 51°56'W e 52°35'W fazem parte de duas províncias geomorfológicas do Estado, o planalto médio e a encosta inferior do nordeste.

O rio Forqueta tem cabeceiras nos municípios de Soledade, Arvorezinha e Barros Cassal, desagua no rio Taquari, que é afluente do rio Jacuí, o maior contribuinte do estuário do rio Guaíba.

A bacia do rio Forqueta está situada no "front" limítrofe da Bacia Geológica do Paraná originada no pré-siluriano ( $430 \times 10^6$  anos), sendo uma bacia intracratônica, sub-estável e sub-negativa, sofrendo acumulação sobre o embasamento antigo de sedimentos marinhos e sedimentos continentais.

Os derrames basálticos responsáveis pelo capeamento da região tem espessuras médias de 35 m, sendo que as maiores não passam de 100 m.

Quanto aos tipos de solos da bacia, pode-se dizer que derivam de rochas efusivas, na sua maior parte, ou de origem de arenitos ou aluviões e, em função disto, são caracterizados em unidades de mapeamento Ciríaco, Charrua, Oásis, Júlio de Castilhos ou Guassupi, (Simmelmann et alii -1978), conforme pode ser visto na Figura (A.3) em anexo.

Quanto às características físicas da bacia, são as seguintes: área de drenagem  $3.139 \text{ Km}^2$ ; coeficiente de compacidade 1,12; fator de forma 0,12; densidade de drena

gem  $0,5 \text{ m/Km}^2$ , e com a declividade do álveo superior igual a  $0,005 \text{ m/m}$  e a do médio e inferior  $0,03 \text{ m/m}$ . Possui duas zonas topográficas distintas; a zona do planalto caracterizada por topografia suave, com declividades inferiores a 20%, e a zona de borda no curso médio e inferior de alta declividade e a borda inferior com baixa declividade, constituindo a planície aluvionar do rio.

Quanto às características climatológicas, tem-se que os eventos pluviométricos têm maior incidência nos meses de outubro e novembro e menor incidência nos meses de janeiro e fevereiro, sendo causados por frentes frias bem caracterizadas, principalmente no inverno, e também por chuvas convectivas que atingem pequenas regiões; as temperaturas máximas, por sua vez, ocorrem nos meses de dezembro e janeiro, enquanto que as mínimas nos meses de junho e julho. Em consequência disso, a evaporação é máxima em dezembro (120 mm) e mínima em julho (50 mm). A umidade relativa é predominantemente alta (superior a 75%) sendo mínima no verão e máxima no inverno onde ocorrem geadas e nevoeiros.

Essa região da bacia hidrográfica do rio Forqueta começou a ser colonizada na segunda metade do século XIX por imigrantes alemães e italianos, iniciando-se nas planícies aluvionares e no planalto, obviamente por que essas terras ofereciam um potencial de exploração maior em relação as bordas das efusivas.

Com o aumento da população, as disponibilidades de

terras nas planícies aluvionares e no planalto foram se tornando cada vez mais escassas e o colono se viu obrigado a utilização de terras das bordas das efusivas, visto que as terras do Norte, Nordeste e Noroeste da bacia do rio Forqueta não se prestam para utilização pela agricultura. Em consequência disso, iniciou-se o processo de erosão do solo com as consequências negativas daí advindas.

### 3.5.2 - Sub-bacias pilotos consideradas no estudo

As bacias vertentes encontradas na região se caracterizam principalmente pela sua topografia, cobertura vegetal e distribuição da cobertura vegetal.

Quanto à topografia das bacias vertentes, caracterizadas pela sua declividade média, foram encontradas três grandes famílias variando em torno de 20%, 40% e 50%, onde a de 40% é a mais frequente e a de 50% a mais rara.

Quanto às coberturas vegetais apresentadas, também foram encontrados, principalmente, três tipos diferentes: o cultivo, os campos mistos e a mata nativa. Os campos mistos podem ser pastagens no planalto ou cerrados nas encostas, ou ainda, zonas de mata nativa que foram utilizadas inicialmente para o cultivo, não apresentando bons resultados. Foram, então, abandonadas proporcionando o crescimento de vegetação nativa.

A mata apresenta-se na forma de bosques isolados. A partir disso, considerando uma distribuição da cobertura vegetal uniforme e única por bacia vertente, chegou-se a nove possíveis sub-bacias pilotos a serem estudadas. A nomenclatura adotada tomou as letras como indicadores das declividades. "A" representa 40%, "B" representa 20% e "C" 50%. Os números indicam o tipo de cobertura do solo na seguinte forma: 1 representa lavoura, 2 representa o campo, 3 representa a mata. Desta forma, as oito bacias, que foram implantadas são assim denominadas:

DECLIVIDADE \ COBERTURA VEGETAL	LAVOURA (1)	CAMPO (2)	MATA (3)
20% (B)	B1	B2	—
40% (A)	A1	A2	A3
50% (C)	C1	C2	C3

Tabela 3.1 - Nomenclatura das sub-bacias identificadas.

Entretanto, considerando a existência de bacias vertentes com cobertura vegetal composta, tem-se a seguinte denominação: bacia A13 quando a declividade média for de 40%, coberta com lavouras, mas contendo mata de galeria no talvegue; bacia B12, quando a declividade média for 20%, coberta com lavoura e campo, e a bacia A12 com 40% de declividade média, coberta também com lavoura e campo.

Em função disto, foram identificadas na região do estudo estes onze tipos de bacias vertentes a serem considerados. Como a operação destas onze sub-bacias-pilotos se tornaria muito onerosa, procurou-se estipular um número mínimo de bacias vertente que permitisse, pelo menos, inicialmente, estudar com eficácia a influência das características físicas (declividade e cobertura vegetal) no processo de erosão do solo e a conseqüente produção efetiva de sedimentos.

Assim, as sub-bacias, inicialmente a serem operadas, foram as seguintes: A1, B1 e A3.

A escolha destas bacias permite o estudo comparativo das características físicas responsáveis pela variação da produção efetiva dos sedimentos na região de uma bacia em relação a outra. Assim, quando se comparam as produções das bacias A1 e A3, verifica-se a influência da cobertura vegetal no desenvolvimento do processo de erosão. E, quando comparam-se as produções das bacias A1 e B1, verifica-se a influência da topografia (declividade) no mesmo processo.

### 3.5.3 - Sistema e equipamentos de medição utilizados

O sistema de medição utilizado foi dividido em duas partes que consistem nas medições hidrométricas e sedimentométricas. As medições hidrométricas são realizadas com a utilização de um pluviógrafo, um pluviômetro e um linígrafo

por bacia vertente operada. O registro contínuo das informações é necessário devido a rapidez com que ocorre a passagem da onda de cheia para uma precipitação nas sub-bacias. O pluviômetro, no caso, é utilizado somente para aferição do pluviôgrafo.

A vazão líquida é avaliada mediante vertedores onde os níveis são registrados pelos linígrafos nos seus respectivos reservatórios de tranquilização. As medições sedimentométricas para o estudo tem por objetivo a determinação da produção efetiva de sedimentos por evento pluvioso.

Essa produção efetiva de sedimentos é medida através do seu transporte na corrente líquida para o intervalo de tempo considerado. A avaliação da descarga sólida de sedimentos através da seção de referência da sub-bacia piloto é determinada de duas maneiras:

1º) A medição do material transportado por arraste é realizada fazendo a sua retenção a montante do respectivo vertedor. Se a bacia vertente considerada é utilizada para o cultivo, é necessário a construção de um muro para retenção dos sedimentos antes do reservatório de tranquilização do vertedor, para não enchê-lo em demasia.

2º) A medição do material transportado em suspensão é obtida conhecendo-se os volumes de água que passam pelo vertedor com as suas respectivas concentrações de sedimentos. Como as concentrações de sedimentos variam com a vazão líquida, é necessário medi-las em vários níveis durante a pas

sagem da onda de cheia. Multiplicando os valores das concentrações de sedimentos num dado instante pela vazão líquida que ocorre no momento, obtêm-se a respectiva vazão sólida em suspensão. Com a interpolação dos vários pontos da vazão sólida em suspensão, durante a passagem da onda de cheia na seção de referência, obtêm-se o respectivo sedimentograma de suspensão, onde a sua área representa o volume do material transportado no período. O referido equipamento de coleta de amostras para a medição das concentrações de sedimentos, foi descrito em Semmelmann et alii (1978) e Canali (1981).

Quanto à aparelhos utilizados para medir a precipitação, nas bacias A1 e A3, em 1978, foram colocados pluviômetros semanais Jules Richard com área de captação de  $400 \text{ cm}^2$ . Em B1 o pluviômetro é do tipo SIAP mensal com área de captação de  $1.000 \text{ cm}^2$ .

Quanto aos linígrafos, eles foram instalados nos reservatórios tranquilizadores dos vertedores com um abrigo de alvenaria cuja função é, além de protegê-los das intempéries do tempo, proporcionar uma menor oscilação dos níveis melhorando a qualidade dos registros.

O aparelho utilizado em todas as sub-bacias-piloto é do tipo IH mensal, permitindo uma precisão de leituras de 1 cm a intervalos de tempo de 10 min.

Em anexo, constam os mapas da bacia do rio Forquetinha e das sub-bacias consideradas, e descrição das estruturas

de coleta de sedimentos, além de fotos aéreas das bacias e de suas estruturas. (Vide págs. 131 a 147)

### 3.6 - Dados disponíveis

Os dados analisados se referem ao período de outubro de 1978 à dezembro de 1979.

Nas tabelas 3.2, 3.3 e 3.4 respectivamente para as bacias A1, B1 e A3 constam as produções de sedimentos ocorridos por arraste, suspensão e a total, por evento pluvioso.

TABELA 3.2

## PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS - BACIA AI

EVENTO Nº	DATA	PRODUÇÃO POR ARRASTE (Kg)	PRODUÇÃO POR SUSPENSÃO (Kg)	TOTAL PRODUZIDO (Kg)
1	25-12-78	4000	2407	6407
2	12-02-79	3630	675	4305
3	09-03-79	4095	2673	6768
4	04-04-79	0	780	780
5	15-04-79	791	1309	2100
6	08-05-79	787	382	1169
7	18-05-79	0	920	920
8	22-05-79	9225	890	10115
9	04-06-79	0	320	320
10	24-06-79	0	0	0
11	06-07-79	2970	1795	4763
12	03-08-79	5274	15660	20934
13	08-08-79	3955	0	3955
14	11-08-79	2475	14	2489
15	25-08-79	0	180	180
16	31-08-79	1650	1156	2806
17	25-09-79	2752	45	2797
18	28-09-79	0	59	59
19	29-09-79	0	2547	2547
20	05-10-79	72255	42660	114915
21	22-10-79	0	49	49
22	24-10-79	0	216	216
23	28-10-79	45900	59241	105141
24	07-11-79	50000	52650	102650

TABELA 3.3

## PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS - BACIA BI

EVENTO Nº	DATA	PRODUÇÃO POR ARRASTE (Kg)	PRODUÇÃO POR SUSPENSÃO (Kg)	TOTAL PRODUZIDO (Kg)
1	25-12-78	-	-	-
2	12-02-79	0	634	634
3	09-03-79	2250	568	2818
4	04-04-79	0	1595	1595
5	15-04-79	787	2248	3035
6	08-05-79	1995	648	2643
7	18-05-79	0	1790	1790
8	22-05-79	11412	9832	21244
9	04-06-79	0	43	43
10	24-06-79	0	1033	1033
11	06-07-79	1687	1579	3266
12	03-08-79	1372	9810	11182
13	08-08-79	630	1215	1845
14	11-08-79	-	-	-
15	25-08-79	0	0	0
16	31-08-79	0	0	0
17	25-09-79	0	76	76
18	28-09-79	0	14	14
19	29-09-79	0	535	535
20	05-10-79	30877	48600	79477
21	22-10-79	0	36	36
22	24-10-79	0	999	999
23	28-10-79	11932	13815	25747
24	07-11-79	4776	9090	13866

Obs.: Não constam informações nos eventos em que não houve operação do sistema de medição

TABELA 3.4

## PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS - BACIA A3

EVENTO Nº	DATA	PRODUÇÃO POR ARRASTE (Kg)	PRODUÇÃO POR SUSPENSÃO (Kg)	TOTAL PRODUZIDO (Kg)
1	25-12-78	-	-	-
2	12-02-79	0	0	0
3	09-03-79	0	82,50	82,50
4	04-04-79	-	-	-
5	15-04-79	-	-	-
6	08-05-79	0	30,00	30,00
7	18-05-79	0	22,70	22,70
8	22-05-79	0	322,00	322,00
9	04-06-79	0	0,80	0,80
10	24-06-79	0	0	0
11	06-07-79	0	208,00	208,00
12	03-08-79	0	59,00	59,00
13	08-08-79	0	110,00	110,00
14	11-08-79	0	805,00	805,00
15	25-08-79	0	0	0
16	31-08-79	0	0	0
17	25-09-79	0	0	0
18	28-09-79	-	-	-
19	29-09-79	-	-	-
20	05-10-79	0	3091,00	3091,00
21	22-10-79	0	0	0
22	24-10-79	0	150,00	150,00
23	28-10-79	0	645,00	645,00
24	07-11-79	0	317,00	317,00

Obs.: Não constam informações nos eventos em que não houve plena operação do sistema de medição.

## 4 - APLICAÇÃO

4.1 - Avaliação dos parâmetros

4.2 - Resultados obtidos pelos modelos

4.3 - Análise dos resultados e conclusões

## 4 - APLICAÇÃO

### 4.1 - Avaliação dos Parâmetros

Estas informações se referem à avaliação numérica por evento pluvioso de todos os parâmetros empregados nos modelos definidos anteriormente. Constam nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 respectivamente para as bacias A1, B1 e A3.

Na tabela 4.5 consta o quadro recapitulativo dos modelos com a respectiva simbologia e na Tabela 4.4 as demais informações necessárias à aplicação dos modelos.

### 4.2 - Resultados obtidos

Os resultados deste trabalho estão consubstanciados nos valores que foram determinados para as constantes e para os parâmetros estatísticos (avaliação) decorrentes da estimação dos modelos de regressão.

Os resultados dos modelos de previsão em função de parâmetros representativos dos eventos pluviosos por bacia são apresentados nas Tabelas 4.8, 4.9, 4.10, respectivamente para as bacias A1, B1 e A3. Os resultados dos modelos conjuntos de A1, B1 e A3 onde se estudam as influências da declividade e da área cultivada no processo de produção de sedimentos estão na Tabela 4.11 e o quadro recapitulativo dos modelos na Tabela 4.12.

TABELA 4.1

INFORMAÇÕES RELATIVAS AOS EVENTOS E AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS - BACIA A1

EVENTO	TP (mm)	E (MJ/ha)	I <sub>30</sub> (mm/h)	R $= \frac{E \cdot I_{30}}{10}$	I <sub>60</sub> (mm/h)	T <sub>30</sub> =TP x I <sub>30</sub>	T <sub>60</sub> =TP x I <sub>60</sub>	QS (mm)	QP (l/s)	QI (l/s)	QSP =Qs x Qp	VPA(8) (mm dia)	VPA(9) (mm dia)	VPA(10) (mm dia)	IP (dias)	IFCU(9) $\frac{R^2 \times VPA(9)}{FC^{-1}}$	IFCU(10) $\frac{R^2 \times VPA(10)}{FC^{-1}}$	DE (HORAS)
1	46	10.77	35	37.68	30	1610	1380	4.9	348	0	17.1	0	8	16	11	11364	22739	10
2	32	6.98	24	16.75	20	767	640	.4	117	0	.5	78	95	114	5	26661	31991	4
3	114	20.15	22	44.34	22	2530	2530	47.7	160	0	76.3	11	22	33	23	43255	64889	98
4	90	14.89	17	25.31	9	1530	809	24.7	78	0	19.3	0	0	5	26	640	3203	61
5	95	19.52	15	29.28	15	1440	1440	28.5	69	-	19.9	0	3	17	10	2575	35150	23
6	44	7.75	10.3	7.89	7	453	307	3.8	10	0	.4	167	193	244	10	3215	5502	20
7	41	8.07	16	12.91	16	656	656	2.6	62	-	1.6	0	16	58	9	714	3552	20
8	61	12.80	32	40.95	32	1952	1919	27.9	237	22	66.2	183	224	265	4	100506	157762	18
9	40	7.36	20	14.71	11	800	400	2.9	18	1	.5	7	9	11	13	1949	2382	23
10	33	6.31	10.5	6.62	10	346	330	1.0	33	1	.3	0	0	0	20	44	44	10
11	67	12.50	18	22.49	7	1206	460	13.5	24	-	3.2	56	68	80	12	34418	40492	51
12	75	16.68	30	50.03	23	2250	1725	16.9	213	1	36.1	14	22	30	13	55067	75093	9
13	38	7.76	16	12.41	8	608	304	24.5	117	21	28.7	377	463	549	0	19076	30030	24
14	34	5.43	14	7.60	6	475	203	8.4	78	40	6.5	399	522	647	3	8068	13256	34
15	13	3.22	16	5.15	9	208	117	0	28	-	0	14	23	32	14	164	298	16
16	23	5.92	38	22.48	19	874	437	0	100	1	0	65	95	104	6	11498	18652	3
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	17	2.90	6	1.74	6	170	101	0	38	18	0	250	30	350	3	262	1060	2
19	23	4.69	18	8.44	8	414	183	12.2	78	20	9.49	419	491	563	1	9370	14224	9
20	106	22.73	34	77.27	34	3603	3603	87.9	410	40	360.86	191	244	346	6	389799	735358	59
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	74	17.36	44	76.37	32	2024	2328	25.4	410	-	104.14	26	31	112	9	180847	653380	10

OBS 1: Não constam as informações dos eventos em que não se  
 OBS 2: Quando não consta uma determinada informação, ocorre

dispõe das medições sedimentométricas.  
 que não se dispõe da mesma ou dos dados necessários à sua avaliação.

TABELA 4.2

INFORMAÇÕES RELATIVAS AOS EVENTOS E AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS - BACIA B1

VENTO	TP (mm)	E (MJ/ha)	$I_{30}$ (mm/H)	$\frac{R}{E} \times \frac{I_{30}}{10}$	$I_{60}$ (mm/H)	$T_{30}$ =TP x $I_{30}$	$T_{60}$ =TP x $I_{60}$	QS (mm)	QP (l/s)	QI (l/s)	$Q_{SP}$ = $Q_s \times Q_p$	VPA(8) (mm dia)	VPA(9) (mm dia)	VPA(10) (mm dia)	IP (dias)	$\frac{IECU(9)}{R^2 \times VPA(9)} \times \frac{1}{FC}$	$\frac{IECU(10)}{R^2 \times VPA(10)} \times \frac{1}{FC}$	DE (HORAS)
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	56.4	11.53	28	32.28	19	1579	1071	32.6	91	0	30.0	45	55	65	23	57320	67746	38
4	93.3	17.44	20	34.88	12	1866	1119	37.9	-	0	-	32	36	40	26	43803	48669	33
5	51.2	9.46	16	15.13	10	819	512	5.1	-	0	-	8	30	129	9	6875	29559	23
6	42.2	7.37	12	8.84	7	506	295	1.6	16	0	.2	138	180	222	7	8346	10408	21
7	45.8	8.58	14	12.01	11	641	503	1.6	25	1	.3	21	64	113	9	5482	9811	22
8	50.0	9.98	42	41.91	20	2100	1000	18.3	187	7	34.5	214	261	307	4	272025	324060	12
9	28.5	4.93	10	4.93	9	285	256	.3	-	2	-	8	10	12	13	243	292	22
10	37.0	7.23	13	-	-	481	444	-	59	2	-	-	-	-	-	-	-	-
11	64.8	11.91	16	19.05	7	1035.9	453	7.8	117	2	9.2	45	54	64	12	19608	23239	53
12	58.4	12.05	24	-	-	1401	1110	-	198	2	-	-	-	-	-	-	-	-
13	37.6	7.23	14	10.12	7	526	263	9.6	187	7	18.2	284	354	424	5	21537	26118	30
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	8.4	1.67	7	1.17	4	57.9	34	1.8	7	1	.1	0	0	0	14	1	1	4
16	15.6	3.15	12	3.87	6	187	93	.3	7	1	.0	37	49	61	6	436	525	15
17	50.0	10.30	29	29.87	18	1450	900	5.8	59	0	3.4	1	2	3	25	779	1610	17
18	17.2	3.48	11	3.82	7	189	119	5.9	14	1	.8	290	340	390	3	2948	3425	6
19	22.8	4.01	12	4.81	7	274	159	9.4	55	4	5.1	375	443	510	1	6087	7099	13
20	105.0	20.60	35	72.10	20	3675	2100	79.4	198	57	157.3	180	269	366	6	829795	1144999	59
21	39.4	8.51	27	-	-	1062.9	630	-	18	1	-	-	-	-	-	-	-	-
22	25.0	3.86	7	2.70	4	174.9	100	11.7	55	5	6.4	280	320	365	2	2336	2664	17
23	48.0	10.30	23	23.69	19	1104	912	18.1	193	5	35.0	245	310	375	4	173976	210456	6
24	65.4	13.70	33	45.22	29	2158	1896	12.4	245	2	30.5	0	7	62	10	14316	126798	29

1: Não constam as informações dos eventos em que não se dispõe das medições sedimentométricas.  
 2: Quando não consta uma determinada informação, ocorre que não se dispõe da mesma ou dos dados necessários a sua avaliação.

TABELA 4.3

INFORMAÇÕES RELATIVAS AOS EVENTOS E AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS - BACIA A3

VENTO	TP (mm)	E (MJ/ha)	I <sub>30</sub> (mm/H)	R = $\frac{E \cdot I_{30}}{10}$	I <sub>60</sub> (mm/H)	T <sub>30</sub> = TP × I <sub>30</sub>	T <sub>60</sub> = TP × I <sub>60</sub>	Q <sub>S</sub> (l/s)	Q <sub>P</sub> (l/s)	Q <sub>I</sub> (l/s)	Q <sub>SP</sub> = Q <sub>S</sub> × Q <sub>P</sub>	VPA(8) (mm dia)	VPA(9) (mm dia)	(VPA(10)) (mm dia)	IP (dias)	$\frac{IFCU(9)}{R^2 \times VPA(9)}$ FC <sup>-1</sup>	$\frac{IFCU(10)}{R^2 \times VPA(10)}$ FC <sup>-1</sup>	DE (HORAS)
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	32	6,98	24	16,77	19	767	608	0	-	-	-	18	21	23	5	5908	6589	4
3	117	22,46	21	47,17	21	2456	2456	25,8	2	-	51.70	16	32	48	23	71206	106810	99
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	45	7,91	12	9,48	8	540	360	4	8	-	3.64	64	103	141	9	9274	12787	20
7	36	7,39	16	12,01	12	576	432	0	10	-	0	6	23	69	9	3324	9782	19
8	43	6,92	8	5,53	28	344	1204	7,4	183	20	1365.18	186	223	260	4	6824	7960	5
9	41	7,54	14	10,55	14	574	574	1	10	0	1.80	8	10	12	13	1114	1337	23
10	31	5,77	11	-	-	341	341	0	8	0	0	-	-	-	-	-	-	-
11	68	12,20	16	19,52	14	1088	951	4,6	22	2	102.96	59	76	91	5	28958	35034	50
12	58	12,94	28	36,23	24	1652	1416	3,0	40	0	121.20	0	5	10	13	6565	13131	9
13	33	6,10	20	12,19	10	660	330	13,0	22	0	290.84	306	375	444	5	55796	66063	24
14	26	4,92	11	5,40	10	286	260	1,3	32	-	43.20	390	488	585	2	14266	17107	24
15	13	2,87	18	5,16	9	234	-	0	6	3	0	7	11	15	14	293	400	3
16	14	3,70	24	-	-	336	196	0	12	3	0	-	-	-	-	-	-	-
17	20	3,79	7	2,65	10	139	200	0	12	0	0	0	0	0	25	7	657	8
18	10	2,35	10	2,34	7	100	69	0	-	-	-	85	101	118	3	562	657	2
19	25	4,20	7	2,94	6	174	150	0	-	-	-	164	191	219	1	1661	1897	21
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	42	9,36	13	16,85	13	756	546	0,2	14	3	3.41	0	14	28	9	3974	7951	5
22	32	5,56	10	5,56	4	320	128	3,0	23	5	70.15	294	336	378	2	10394	11693	12
23	56	12,18	24	29,23	20	1344	1119	2,1	193	20	420.98	286	360	434	4	307581	370857	5
24	90	21,40	38	81,33	32	3419	2880	14,6	68	4	992.80	0	0	48	10	6616	317569	9

BS 1: Não constam as informações dos eventos em que não se

dispõe das medições sedimentométricas.

BS 2: Quando não consta uma determinada informação, ocorre

que não se dispõe da mesma ou dos dados necessários à sua avaliação.

TABELA 4.4

## INFORMAÇÕES RELATIVAS ÀS BACIAS A1, B1 e A3

	B A C I A S		
	A1	B1	A3
DR ≈	0,44	0,47	0,455
K ≈	0,51	0,51	0,51
L ≈	290 m	230 m	270 m
P ≈	1	1	0
C <sub>1</sub>	0,84	0,84	0,01
C <sub>2</sub>	0,17	0,17	0,01
FC <sub>1</sub>	1	1	1
FC <sub>2</sub>	0,355	0,601	1
AREA	0,922 Km <sup>2</sup>	0,532 Km <sup>2</sup>	0,678 Km <sup>2</sup>
DECLIVID.	40%	25%	40%

OBS 1: DR, K, L, P, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> são parâmetros relativos à Equação Universal de Perda do Solo e FC o fator de correção definido na equação (3.10)

OBS 2: Os coeficientes 1 e 2 de C e FC são relativos ao sub-ciclos considerados dentro do ciclo anual de utilização do solo. O índice 1 se refere ao ciclo tido como base, representando o período do ano em que o solo está mais desprotegido (época do preparo da terra para o plantio, colheita...) e o índice 2 se refere ao período do ano em que o solo está semi-protegido (época da maturação dos cultivos, do período em que é abandonada e cresce o capim). O período 1 engloba os eventos n<sup>os</sup> 1,2,3,4,5,9,10,11,12,22,23,24. O período 2 engloba os eventos 6,7,8,13,14,15,16,17,18,19,20,21.

TABELA 4.5

## RESULTADOS OBTIDOS - BACIA AI

MODELO Nº	VARIAVEIS	EVENTOS CONSIDER.	a	b	c	d	e	COEF. DE DETERM.	COEF. DE DETERM. AJUSTADO	COEF. DE CORRELAÇ. MULTIPLA	ERRO PADRÃO DA ESTIMATIVA EM TONELADAS	F. CALC.
3	TP	20	13432.24	544.20	-	-	-	.19	.15	.44	31.28	4.61
4	TP	20	.04	2.68	-	-	-	.13	.08	.37	35.79	2.43
5	T30	20	-16662.30	26.99	-	-	-	.40	.37	.63	25.03	14.72
6	T30	20	4.14	2.89	-	-	-	.30	.26	.54	25.03	10.83
7	T60	20	-11994.01	27.66	-	-	-	.51	.49	.71	22.42	23.28
8	T60	20	7.74	1.87	-	-	-	.15	.10	.38	29.79	3.87
9	QS	20	-3628.64	1155.37	-	-	-	.45	.42	.67	25.39	16.05
10	QS	20	974.96	.38	-	-	-	.15	.10	.38	37.28	2.46
11	QP	20	13823.62	224.05	-	-	-	.56	.54	.75	20.37	30.74
12	QP	20	.13	2.08	-	-	-	.18	.13	.42	26.51	5.85
13	QPS	20	1568.76	374.29	-	-	-	.74	.72	.86	18.03	51.59
14	QPS	20	949.46	.45	-	-	-	.13	.08	.37	35.05	2.52
15	TP-IP	20	4316.01	766.56	2120.25	-	-	.25	.16	.50	27.40	3.61
16	TP-IP	20	.02	2.96	.34	-	-	.16	.04	.38	36.03	1.20
17	T30-IP	20	-8082.00	30.14	1434.55	-	-	.57	.52	.76	16.70	22.12
18	T30-IP	20	2.21	3.06	-.40	-	-	.38	.31	.62	17.72	13.15
19	T60-IP	20	-1249.84	28.98	-1218.13	-	-	.54	.49	.73	20.41	13.95
20	T60-IP	20	2.73	2.14	.42	-	-	.19	.09	.43	27.74	2.68
21	R-VPA(8)	20	-28010.20	1437.43	55.17	-	-	.68	.57	.78	15.65	26.94
23	R-VPA(9)	20	28005.27	1434.01	44.75	-	-	.61	.57	.78	15.68	26.80
25	R-VPA(10)	20	28805.10	1417.25	42.18	-	-	.62	.58	.79	15.12	29.32
27	R-QI	15	-23205.34	1066.35	857.92	-	-	.64	.58	.80	13.48	20.93
28	R-QI	15	.65	2.63	.05	-	-	.40	.30	.63	13.14	13.88
29	TP-DE-160-VPA(8)	20	-44050.30	433.48	-175.80	2071.60	65.65	.41	.26	.64	23.49	3.58
31	TP-DE-160-VPA(9)	20	-39444.62	413.66	-191.24	1978.51	45.01	.39	.23	.63	23.87	3.29
33	TP-DE-160-VPA(10)	20	-45907.30	460.12	-206.68	2015.41	53.30	.42	.27	.65	22.60	3.96
35	R-IP	20	-4148.71	1355.28	-1134.21	-	-	.64	.60	.80	15.58	28.38
36	R-IP	20	1234.32	.21	-.23	-	-	.16	.06	.40	38.25	1.19
37	IFCU(9)	20	1696.27	.07	-	-	-	.94	.94	.97	8.08	328.17
39	IFCU(10)	20	-469.40	.16	-	-	-	.98	.98	.99	4.48	1104.05

OBS 1: Em cada modelo são considerados todos os eventos em

que se dispõe das informações necessárias.

OBS 2: Não constam os resultados dos modelos que levam a uma

avaliação irreal do coeficiente de determinação.

OBS 3: a,b,c,d,e são os coeficientes dos modelos de regressão

TABELA 4.6

## RESULTADOS OBTIDOS - BACIA BI

MODELO Nº	VARIAVEIS	EVENTOS CONSIDER.	a	b	c	d	e	COEF. DE DETERM.	COEF. DE DETERM. AJUSTADO	COEF. DE CORRELAÇÃO MULTIPLA	ERRO PADRÃO DA ESTIMATIVA EM TONELADAS	F. CALC.
3	TP	21	19780.28	694.73	-	-	-	.30	.26	.55	20.08	10.05
5	T30	21	11933.04	23.34	-	-	-	.52	.49	.72	15.60	28.36
7	T60	21	-9934.99	33.03	-	-	-	.43	.40	.66	18.04	17.76
9	QS	18	-4718.70	1226.74	-	-	-	.66	.64	.81	15.34	36.34
11	QP	18	5355.31	197.14	-	-	-	.29	.25	.54	23.06	7.15
13	QSP	15	1466.31	753.22	-	-	-	.93	.93	.96	6.69	256.46
15	TP-IP	18	9630.10	912.87	1937.17	-	-	.43	.35	.65	15.07	11.48
17	T30-IP	18	1512.53	26.77	1626.33	-	-	.70	.66	.84	10.82	36.41
19	T60-IP	18	3663.77	39.10	1631.34	-	-	.62	.57	.78	14.59	17.61
21	R-VPA(8)	18	1952.08	1220.58	62.99	-	-	.56	.50	.75	14.03	17.28
23	R-VPA(9)	18	-20534.14	1202.26	58.86	-	-	.57	.51	.75	13.33	19.54
25	R-VPA(10)	18	-21630.45	1175.84	55.10	-	-	.58	.52	.76	12.72	21.58
27	R-QI	21	-4743.17	445.43	1604.01	-	-	.91	.90	.95	7.08	114.60
29	TP-DE 160-VPA(8)	18	-39042.42	359.05	449.78	1260.66	79.38	.36	.17	.60	17.06	3.30
31	TP-DE 160-VPA(9)	18	-40058.75	340.89	452.34	1273.32	73.43	.38	.19	.61	16.20	3.81
33	TP-DE 160-VPA(10)	18	-40663.74	319.47	459.35	1237.89	67.75	.38	.20	.62	15.57	4.18
35	R-IP	18	2071.86	1325.13	-1609.25	-	-	.70	.66	.83	11.23	33.59
37	IFCU(9)	18	1749.87	.13	-	-	-	.95	.95	.97	5.85	358.76
39	IFCU(10)	18	1377.63	.10	-	-	-	.97	.97	.98	4.38	652.01

OBS 1: Em cada modelo são considerados todos os eventos em que se dispõe das informações necessárias.

OBS 2: Não constam os resultados dos modelos que levam a uma avaliação irreal do coeficiente de determinação.

OBS 3: a,b,c,d,e são os coeficientes dos modelos de regressão

TABELA 4.7

## RESULTADOS OBTIDOS - BACIA A3

MODELO Nº	VARIAVEIS	EVENTOS CONSIDER.	a	b	c	d	e	COEF. DE DETERM.	COEF. DE DETERM. AJUSTADO	COEF. DE CORRELAÇÃO MÚLTIPLA	ERRO PADRÃO DA ESTIMATIVA EM TONELADAS	F. CALC.
3	TP	20	82.03	2.10	-	-	-	.03	.01	.19	.27	.73
5	T30	20	115.60	.06	-	-	-	.04	.01	.20	.27	.77
7	T60	20	105.96	.08	-	-	-	.06	.01	.24	.27	1.16
8	T60	20	1.56	3.95	-	-	-	.58	.55	.76	.32	7.56
9	QS	20	146.64	6.04	-	-	-	.02	.03	.14	.27	.39
10	QS	20	15.61	1.15	-	-	-	.44	.41	.67	.32	6.15
11	QP	17	77.32	3.12	-	-	-	.38	.34	.61	.23	9.34
13	QSP	17	139.19	.29	-	-	-	.15	.10	.39	.27	2.73
14	QSP	17	1.55	.82	-	-	-	.45	.41	.67	.28	7.09
15	TP-IP	18	212.36	3.47	-20.28	-	-	.12	.01	.35	.24	1.28
16	TP-IP	18	6.97	8.20	-2.07	-	-	.91	.89	.95	.38	3.89
17	T30-IP	18	270.33	.10	-19.45	-	-	.14	.02	.37	.25	1.42
19	T60-IP	18	264.64	.13	-20.62	-	-	.16	.05	.40	.24	1.74
20	T60-IP	18	1.81	4.42	-2.53	-	-	.91	.90	.95	.34	4.92
21	R-VPA (8)	18	108.33	6.03	1.80	-	-	.57	.51	.75	.17	12.39
23	R-VPA (9)	18	119.04	6.01	1.52	-	-	.59	.53	.77	.16	13.85
24	R-VPA (9)	18	3.04	3.85	.47	-	-	.41	.34	.64	.32	2.42
25	R-VPA (10)	18	123.05	5.44	1.31	-	-	.60	.55	.77	.15	14.92
26	R-VPA (10)	18	6.55	2.92	.73	-	-	.42	.34	.64	.31	2.60
27	R-QI	13	-36.33	4.39	27.57	-	-	.82	.78	.90	.09	25.75
29	TP-DE160-VPA	18	261.74	1.42	-.88	14.75	-	.62	.50	.78	.15	7.15
31	TP-DE160-VPA	18	270.66	1.31	.94	15.02	-	.64	.53	.80	.14	8.19
33	TP-DE160-VPA	18	-273.57	.70	-.49	15.41	-	.66	.56	.81	.14	9.18
35	R-IP	18	260.61	4.32	-17.42	-	-	.14	.03	.38	.25	1.43
37	FCU(9)	18	125.48	2.12	-	-	-	.28	.23	.52	.24	6.22
39	FCU(10)	18	110.161	1.39	-	-	-	.28	.23	.53	.24	6.26

- OBS 1: Em cada modelo são considerados todos os eventos em que se dispõe das informações necessárias.
- OBS 2: Não constam os resultados dos modelos que levam a uma avaliação irreal do coeficiente de determinação.
- OBS 3: a, b, c, d, e são os coeficientes dos modelos de regressão.

TABELA 4.8

## RESULTADOS OBTIDOS - BACIA A1, B1 e A3

BACIAS	MODEL Nº	VARIAVEIS	EVENTOS CONSIDER.	a	b	c	d	COEF. DE DETERM.	COEF. DE DETERM. AJUSTADO	COEF. DE CORRELAÇÃO MÚLTIPLA	ERRO PADRÃO DA ESTIMATIVA EM TONELADAS	F. CALC.
A1, B1	41	FCU(10)-D	38	-7696.18	.12	285.37	-	.89	.89	.94	9.39	172.04
A1, B1	43	FCU(10)-D	35	-8390.43	.12	307.48	-	.89	.88	.94	9.76	155.66
A1, B1	44	FCU(10)-D	35	.03	.94	.60	-	.71	.69	.84	7.06	235.57
A1, B1	45	FCU(10)-D	32	-9212.19	.12	333.32	-	.89	.88	.94	10.18	139.27
A1, B1	46	FCU(10)-D	32	.18	.85	.37	-	.50	.47	.71	11.74	59.42
A1, B1	47	FCU(10)-D	26	-10978.40	.12	406.98	-	.89	.88	.94	11.18	107.07
A1, B1	48	FCU(10)-D	26	.63	.82	.13	-	.45	.40	.67	15.33	28.72
A1, B1	49	FCU(10)-D	08	.25	.85	.34	-	.74	.64	.86	14.85	19.51
A1, B1	50	FCU(10)-D	08	-.28	.11	1227.81	-	.87	.81	.93	17.30	16.84
A1, A3	51	FCU(10)-AC	38	-7271.78	.13	99.41	-	.73	.72	.85	10.53	77.04
A1, A3	53	FCU(10)-AC	31	-10941.50	.13	134.54	-	.73	.72	.85	11.22	69.86
A1, A3	54	FCU(10)-AC	31	.19	.86	.26	-	.38	.33	.61	12.28	30.24
A1, A3	55	FCU(10)-AC	25	-16424.07	.14	186.46	-	.74	.72	.86	11.22	67.30
A1, A3	56	FCU(10)-AC	25	1.26	.70	.21	-	.17	.10	.42	21.21	4.53
A1, B1, A3	57	FCU(10)-AC-D	56	17095.70	.11	108.30	275.68	.79	.78	.89	10.20	91.61
A1, B1, A3	59	FCU(10)-AC-D	47	20784.30	.11	139.21	294.18	.79	.77	.89	10.73	79.66
A1, B1, A3	60	FCU(10)-AC-D	47	.01	.91	.26	.60	.56	.53	.75	8.36	93.72
A1, B1, A3	61	FCU(10)-AC-D	39	-25976.60	.11	183.27	316.60	.79	.77	.89	11.21	69.67
A1, B1, A3	62	FCU(10)-AC-D	39	.20	.76	.21	.32	.29	.23	.54	16.27	12.23

OBS 1: Em cada modelo são considerados todos os eventos em que se dispõe das informações necessárias.

OBS 2: Não constam os resultados dos modelos que levam a uma avaliação irreal do coeficiente de determinação

OBS 3: a, b, c, d, e são os coeficientes dos modelos de regressão.

TABELA 4.9

## QUADRO RECAPITULATIVO DOS MODELOS

$Y_1 = R K.L.S.C.P.DR$	$Y_{21} = a + bR + VPAL(B) . c$
$Y_2 = 14.8(QSxQP)^{0.5} . K.L.S.C.P.DR$	$Y_{22} = a . R^b . VPA(8)^c$
$Y_3 = a + bTP$	$Y_{23} = a + bR + cVPA(9)$
$Y_4 = a . TP^b$	$Y_{24} = a . R^b . VPA(9)^c$
$Y_5 = a + T30 . b$	$Y_{25} = a + bR + cVPA(10)$
$Y_6 = a . T30^b$	$Y_{26} = a . R^b . VPA(10)^c$
$Y_7 = a + bT60$	$Y_{27} = a + bR + cQI$
$Y_8 = a . T60^b$	$Y_{28} = a . R^b . QI^c$
$Y_9 = a + bQS$	$Y_{29} = a + bTP + cDE + dI60 + c VPA(8)$
$Y_{10} = a . QS^b$	$Y_{30} = a . TP^b . DE^c . I60^d . VPA(8)^c$
$Y_{11} = a + bQP$	$Y_{31} = a + bTP + cDE + dI60 + cVPA(9)$
$Y_{12} = a . QP^b$	$Y_{32} = a . TP^b . DE^c . I60^d . VPA(9)^c$
$Y_{13} = a + bQSP$	$Y_{33} = a + bTP + cDE + dI60 + c VPA(10)$
$Y_{14} = a . QSP^b$	$Y_{34} = a . TP^b . DE^c . I60^d . VPA(10)^c$
$Y_{15} = a + bTP + cIP$	$Y_{35} = a + bR + cIP$
$Y_{16} = a . TP^b . IP^c$	$Y_{36} = a . R^b . IP^c$
$Y_{17} = a + bT30 + cIP$	$Y_{37} = a + b . fFCU(9)$
$Y_{18} = a . T30^b . IP^c$	$Y_{38} = a . fFCU(9)^b$
$Y_{19} = a + bT60 + cIP$	$Y_{39} = a + b . fFCU(10)$
$Y_{20} = a . T60^b . IP^c$	$Y_{40} = a . fFCU(10)^b$

onde

$Y_i$  é a produção específica efetiva de sedimentos estimada pelo modelo  $i$  em  $Kg/Km^2$ ,  $R$  é o fator de energia cinética da chuva por evento da Equação Universal de Perda do Solo, E.U.P.S., dado na equação (3.1),  $K$  é o fator de erodibilidade do solo na E.U.P.S., obtido na Figura (B.1),  $L$  é o comprimento da vertente representativa da bacia em metros,  $D$  ou  $S$  é a declividade média da bacia em porcentagem,  $C$  é o fator de gerenciamento dos cultivos do solo da E.U.P.S. obtidos nas tabelas (B.1) e (B.2),  $P$  é o fator de práticas de conservação do solo, da E.U.P.S.,  $TP$  é o total precipitado por evento em mm.,  $T30$  é a intensidade máxima média de 30 min em mm/h, multiplicado pelo total precipitado  $P$  em mm,  $T60$  é a intensidade máxima média de 60 min em mm/h, multiplicado pelo total precipitado  $P$  em mm,  $QS$  é o escoamento superficial por evento, em mm do total precipitado,  $QP$  é a vazão de pico do evento considerado em l/s,  $QSP$  é dado pelo produto de  $QP$  e  $Qs$ ,  $IP$  é um índice de precipitações anteriores que indica o número de dias até ocorrer uma precipitação maior que 10mm,  $VPA$  é a variação da precipitação antecedente dada na equação (3.6), para representar indiretamente o teor de umidade do solo ao início do evento pluviométrico em mm,  $QI$  é a vazão de base no início do evento em l/s,  $DE$  é a duração do evento em horas,  $I60$  é a intensidade máxima média ocorrida em 60 min no evento,  $fFCU(I)$  é o fator de chuva e umidade do solo considerado as chuvas acontecidas até  $I$  dias antecedentes ao evento, conforme definido na equação (3.10),  $DR$  é o "delivery ratio" obtido na Figura (B.2),  $a, b, c \dots$  são constantes do modelo de regressão.

#### 4.3 - Análise dos Resultados e Conclusões

A análise dos resultados consistirá de duas etapas: a primeira relativa aos modelos de previsão aplicados à cada bacia isoladamente, função exclusiva dos parâmetros representativos dos eventos pluviosos. A segunda etapa da análise se refere aos modelos estimados em função de dados referentes a mais de uma bacia, onde se estuda a influência de características físicas (área cultivada e/ou declividade) na variação do processo de produção dos sedimentos.

Antes da análise dos resultados é necessário observar o seguinte:

- será empregado o termo "modelo ou modo linear" aos modelos que tem a forma  $(Y = a + bx_1 + cx_2 + \dots)$  e "modelo ou modo logarítmico" para a forma  $(Y = a \cdot x_1^b \cdot x_2^c \dots)$ , por serem determinados a partir de uma anamorfose logarítmica utilizada para sua obtenção.
- os resultados proporcionados pelos modelos, classificados segundo o coeficiente de determinação, seguirão o critério abaixo determinado.

Se $R^2$ é ao intervalo	resultados considerados
(0; 0,5)	não aceitáveis ou pouco significativos
{0,5; 0,7}	aceitáveis ou razoáveis
{0,7; 0,8}	bons
{0,8; 0,95}	muito bons
{0,95; 1}	excelentes
$(-\infty; 0) \cup (1; +\infty)$	irreais ou inconsistentes

- devido estarem somente 3 sub-bacias em operação na região, o estudo da influência da declividade e da porcentagem da área cultivada na variação da produção de sedimentos, obtida análise dos coeficientes dos modelos de regressão, não devem ser considerados como previsões, mas sim como uma estimativa da ordem de grandeza dentro da qual variam as produções de sedimentos, para o período de tempo considerado e as informações disponíveis.

Dos modelos n<sup>o</sup>s 1 e 2 fica apenas o registro da não aplicabilidade às bacias em estudo, como se deveria esperar, por renegar quase todas condições de aplicação sugeridas em suas definições tais como: aplicação a intervalos de tempo de um ano e não a eventos pluviosos isolados para previsão, declividades muito grandes tornando pouco sensíveis os parâmetros C e P e características físicas das bacias bem diferente de uma parcela experimental. As previsões obtidas pelas equações superestimaram as produções de sedimentos em 50 vezes ou mais para a maioria dos eventos.

Modelo 3 e 4: Função do total precipitado TP em mm. Os resultados foram pouco significativos. O modelo linear apresentou um resultado levemente superior ao modelo logarítmico. Os resultados de A3 foram inferiores aos de A1 e B1. Os modelos não conseguiram explicar nem 20% da variação da produção de sedimentos, tendo um erro padrão maior que  $30 \text{ t/Km}^2$ , caracterizando quase uma aleatoriedade do processo.

Conclusão: O parâmetro TP, isoladamente, não é um bom fator representativo das chuvas com a finalidade de explicar a produção de sedimentos, pois este processo depende muito da distribuição da chuva, principalmente para o período de um evento isolado, onde as intensidades máximas são muito importantes.

Modelo 5 e 6: Função do produto do total precipitado TP pela intensidade máxima média da chuva em 30 min., I30. O parâmetro é representado por T30. O modelo linear apresentou razoáveis resultados para A1 e B1, conseguindo explicar, quase 50% da produção de A1, valor aceitável em termos de sedimentos, mas teve um erro padrão da estimativa elevado em torno de 25 t/Km<sup>2</sup>. O modelo logarítmico não apresentou resultados aceitáveis.

Conclusão: O parâmetro T30 não é um bom indicador para representar a chuva com a finalidade de explicar a produção de sedimentos, embora o modelo 5 apresente resultados superiores ao modelo 3. Isto devido à intensidade máxima média de 30 min., que melhorou a representatividade do parâmetro TP.

Modelo 7 e 8: Função do total precipitado TP pela intensidade máxima média de 60 min., I60. O parâmetro é denominado T60. Apresentou quase os mesmos resultados dos modelos em função de T30. Para o ajuste na forma linear os resultados foram não aceitáveis para A1 e B1, com um erro padrão de 22 t/Km<sup>2</sup>. A forma logarítmica apresentou resultados razoáveis para a bacia A3.

Conclusão: Ficou demonstrado que as intensidades máximas I60 e I30 tem importância no processo de produção de sedimentos, embora os parâmetros T60 e T30 não sejam suficientes para prever a erosão do solo e a produção de sedimentos.

Modelos 9 e 10: Função do escoamento superficial QS em mm. O modelo linear apresentou razoáveis resultados para A1 e B1, explicando mais de 60% da produção de sedimentos, mas com elevado erro padrão da estimativa diminuindo a confiabilidade no resultado. O modelo logarítmico teve resultados inconsistentes para A1 e B1.

Conclusão: Este parâmetro talvez devesse apresentar melhor resultado para A1 e B1, pois é o escoamento superficial do solo que transporta o sedimento até a seção de referência, sendo o responsável direto pela produção efetiva dos sedimentos. Isto é consequência do método utilizado para separação dos escoamentos ser muito geral oferecendo pouca precisão para eventos pluviosos isolados. O ideal seria estabelecer um balanço hídrico contínuo no tempo, mas isso não foi possível com as informações disponíveis.

Modelos 11 e 12: Função da vazão de pico QP, em l/s. Para a sub-bacia A1 o coeficiente de determinação foi de 0,56 mas com erro padrão da estimativa de 22 t/Km<sup>2</sup>. Para B1 o R<sup>2</sup> foi de 0,29 com um erro padrão de 23 t/Km<sup>2</sup>.

Os modelos logarítmicos apresentaram resultados in

consistentes com uma superestimação da produção de sedimentos para os grandes picos, levando a resultados irreais para o coeficiente de determinação.

Conclusão: Poderia se esperar mais deste parâmetro, porque a vazão de pico depende da distribuição da chuva e da umidade do solo para eventos isolados. Isto deve-se ao fato de não considerar o volume de escoamento superficial. Cabe também considerar que, os resultados reforçam a hipótese da não contribuição significativa da calha no total da produção de sedimentos onde as áreas das sub-bacias consideradas são muito pequenas e não existe a caracterização de uma rede de drenagem, principalmente dentro da macro-análise que está sendo feita.

Modelos 13 e 14: Função do produto do escoamento superficial (em mm) por QP em l/s. Foi chamado de QSP. Os modelos lineares apresentaram bons resultados para A1 e B1 explicando 72% e 93% da produção de sedimentos, com o erro padrão menor que  $20 \text{ t/Km}^2$ . Para A3 o resultado foi pouco significativo, devido à sua pequena produção que leva a grandes variações percentuais em sua produção, geralmente não explicáveis pelos parâmetros. Nos modelos logarítmicos, o resultado de A1 e A3 foram pouco significativos e para B1 o resultado apresentado foi inconsistente devido a superestimação dos valores extremos.

Conclusão: Os resultados foram bons, embora os registros de chuva e níveis não permitirem leitura em intervalos de 10 min. o que possibilitaria uma determinação mais exata do escoamento superficial.

Modelos 15 e 16: Função do total precipitado TP e IP, número de dias antecedentes ao evento até ocorrer uma chuva maior de 10 mm. Aqui é a primeira vez onde explicitamente se introduz um parâmetro para avaliar indiretamente a variação do teor de umidade do solo no início dos eventos. Os modelos lineares apresentaram resultados pouco significativos. O melhor foi de B1 com coeficiente de determinação  $R^2$  de 35 e erro padrão de  $15 \text{ t/Km}^2$ . Os resultados dos modelos logarítmicos foram piores, mas para A3, curiosamente, o  $R^2$  foi de 0,89, mas com erro padrão acima da média dos valores observados.

Conclusão: O resultado do modelo 15 é melhor que o do modelo 3, demonstrando que a umidade do solo no início do evento influencia o processo de erosão do solo. Os resultados, de uma maneira geral, indicam que TP e IP são parâmetros que representam mal a chuva e umidade do solo com a finalidade de prever a produção de sedimentos.

Modelo 17 e 18: Função T30, produto de TP (em mm) por I30, em mm/h, e IP, em dias. Os únicos resultados razoáveis ocorreram para os modelos lineares de A1 e B1 explicando, respectivamente, 57% e 70% da produção dos sedimentos. O erro padrão da estimativa foi de  $16 \text{ t/Km}^2$  para A1 e  $10 \text{ t/Km}^2$  para B1.

Conclusão: Os resultados referidos foram aceitáveis melhorando a estimativa feita para T30 devido ao fator indicativo da umidade do solo.

Modelos 19 e 20: Função de T60, produto de TP, em mm, por I60, em mm/h, e IP, em dias. Também os únicos resultados razoáveis foram para os modelos lineares A1 e B1 com  $IR^2$  de 54% e 62% e com erro padrão da estimativa de 20 t/Km<sup>2</sup> e 14 t/Km<sup>2</sup> respectivamente.

Conclusão: Para os resultados apresentados, nota-se uma melhora com a introdução de um parâmetro indicativo do teor de umidade do solo.

Os modelos empregados até aqui permitem tirar algumas conclusões da relação entre os resultados. Nota-se uma melhora nos parâmetros representativos das chuvas quando é feito uso das intensidades máximas médias em relação ao total precipitado. Com o parâmetro adicional relativo ao teor de umidade do solo, no início dos eventos, as relações anteriores foram mantidas, melhorando os resultados. De maneira absoluta, porém, os resultados não são confiáveis. Assim, foram testados novos parâmetros com a finalidade de representar a chuva e/ou umidade do solo em modelos de previsão de sedimentos produzidos.

Modelos 21 e 22: Função do fator de energia da chuva R e da variação da precipitação antecedente até 8 dias, VPA(8). Os modelos lineares apresentaram aceitáveis resultados explicando em torno de 60% a variação da produção dos sedimentos com o erro padrão de 15 t/Km<sup>2</sup>, e para A3, o resultado foi pouco significativo. Os modelos logarítmicos levaram a superestimação dos maiores valores de produção.

Conclusão: Demonstrou alguma superioridade dos parâmetros R e VPA(8). Só não é possível saber se a melhora é devido ao parâmetro de chuva ou de umidade do solo. Os resultados de A3 são conseqüências do pequeno valor de sua produção de sedimentos, o que leva a variações percentuais de produção muito grande de um evento para outro, quase para os mesmos parâmetros. Às vezes, ocorre também uma mesma produção para chuvas diferentes, caracterizando quase uma aleatoriedade do processo de produção. Já os modelos logarítmicos levam a superestimação dos valores extremos porque consideram todos os eventos com mesma influência na estimação dos modelos. Como existem poucos valores extremos, principalmente para B1, o modelo segue a lei de variação dos valores pequenos e médios, superestimando a previsão dos eventos de maior produção de A3. Isto leva a uma avaliação irreal para o coeficiente de determinação.

Modelos 23 e 24: Função do fator de energia da chuva R e da variação da precipitação antecedente até nove dias ao evento, VPA(9). Os modelos lineares tiveram uma pequena melhora em relação aos anteriores, inclusive para A3. Os modelos logarítmicos tiveram os mesmos problemas.

Conclusão: A consideração de até nove dias anteriores ao evento para o cálculo da variação da precipitação, VPA(9) acarretou uma melhora global do modelo.

Modelos 25 e 26: Função do fator de energia da chuva R e da variação da precipitação antecedente até dez dias

VPA(10). Teve também uma pequena melhora em relação ao anterior inclusive para A3, com um EP de BI de  $12 \text{ t/Km}^2$ . Os modelos logarítmicos levaram a superestimação dos valores extremos.

Conclusão: Até aqui, nota-se uma superioridade do parâmetro R para representar a chuva, e também da VPA(10) para representar o teor de umidade do solo.

A seguir foi testado o emprego de outro parâmetro para a umidade do solo:

Modelos 27 e 28: Função do fator de energia da chuva R e da vazão de base no início do evento, em l/s. Os resultados foram os melhores até aqui. Os modelos lineares para BI tiveram um erro padrão de  $7 \text{ t/Km}^2$  com um coeficiente de determinação de 0,9. Para A1 o erro padrão foi de  $13 \text{ t/Km}^2$  com  $R^2$  de 0,64. Para A3 o erro padrão foi de  $0.095 \text{ t/Km}^2$  com  $R^2$  de 0,85.

Conclusão: A vazão de base ao início do evento pode ser um bom indicador do teor de umidade do solo, superior aos anteriores. Infelizmente não se dispõe desta informação para todos os eventos, o que permitiria maiores conclusões.

A seguir foi verificada a eficiência do fator R trocando-o por parâmetros característicos das chuvas combinados com parâmetros representativos para o teor de umidade, como VPA(8), VPA(9), VPA(10), anteriormente utilizados com R.

Modelos 29 e 30, 31 e 32, 33 e 34: Função do total precipitado TP, em mm, da duração do evento DE, em horas, e da intensidade máxima média de 60 min da chuva, 160, em mm/h, para representar evento pluvioso. Para umidade do solo foram empregados VPA(8) para os modelos 29 e 30, VPA(9) para 31 e 32 e VPA(10) para 33 e 34. Os resultados foram inferiores aos dos modelos em função do parâmetro R.

Modelos 35 e 36: Função de R, fator de energia cinética da chuva e IP, Índice de precipitações anteriores. Os resultados foram melhores que os apresentados pelos modelos 29 a 34 anteriores.

Conclusão: A relação entre os resultados demonstrou a superioridade do parâmetro R sobre TP, 160 e DE, parâmetros característicos da chuva. Os parâmetros indicativos indiretos do teor de umidade do solo ficaram num mesmo nível.

Os modelos seguintes foram determinados a partir de um fator de chuva e umidade do solo definido em função do fator de energia cinética da chuva, R, e da variação da precipitação antecedente, VPA(10). Desta forma, foi proposta uma correção neste fator para levar em consideração as duas épocas de apresentação do solo. Uma desprotegida, para época de preparo da terra ao plantio, colheita, etc., e a outra semi-protegida, para época do abandono da terra quando cresce o capim nativo e durante a fase final de crescimento e maturação dos cultivos.

Modelos 37 e 38: Função do fator de chuva e umidade do solo corrigidos IFCU(9). O modelo linear apresentou muito bons resultados conseguindo explicar 94% da variação da produção de sedimentos com um erro padrão de 8t/km<sup>2</sup> para A1 e B1. O modelo logarítmico superestimou os resultados.

Conclusão: O fator FCU é representativo das chuvas e umidade antecedente ao evento. Por ser um único fator representativo para explicar a produção de sedimentos, ele pode ser corrigido a fim de levar em consideração as épocas do ano em função do ciclo de utilização do solo. Por isso os resultados foram muito bons, demonstrando a influência da apresentação do solo no processo de produção de sedimentos.

Modelos 39 e 40: Função do fator de chuva e umidade do solo IFCU(10). O modelo linear apresentou excelentes resultados explicando 98% da variação da produção de sedimentos com um erro padrão de 4t/km<sup>2</sup> para A1 e B1.

Conclusão: O resultado deste foi superior ao anterior comprovando a maior eficiência de VPA(10) sobre VPA(9).

O fator de chuva e umidade do solo corrigido é que apresentou melhor resultado para estimação dos modelos até aqui. Por isso será empregada para estudar a influência da declividade e da área cultivada no processo de produção. Os primeiros modelos são relativos ao estudo da influência da declividade através do parâmetro D que será introduzido na equação. Logo as equações serão função de IFCU(10), com os da-

dos de A1 e B1 que diferem apenas no que se refere à declividades. As demais características físicas são semelhantes. Assim, as equações serão função de IFCU(10) e da declividade D, da seguinte forma:

Modelos 41 e 42: Consideram todos os eventos pluviosos de A1 e B1, inclusive aqueles sem produção de sedimentos. O modelo linear apresentou muito bom ajuste explicando 90% da variação da produção com erro padrão de  $9 \text{ t/Km}^2$ . O modelo logarítmico superestimou o resultado para os valores extremos.

Conclusão: Como o modelo apresentou bom ajuste, pode-se estimar a influência da declividade na produção de sedimentos. Pode-se avaliar, pelo menos na ordem de grandeza que, em média, para um evento pluvioso médio, cada grau de aumento da declividade acarretou um aumento em torno de  $285 \text{ Kg/Km}^2$  na produção de sedimentos no período de tempo considerado.

Modelos 43 e 44: Não consideram os eventos pluviosos de A1 e B1 sem produção de sedimentos. O modelo apresentou muito bons resultados. O modo linear explicou a variação de 90% da produção com erro padrão de  $9 \text{ t/Km}^2$ . O modo logarítmico explicou a variação de 70% da produção com erro padrão de  $7 \text{ t/Km}^2$ .

Conclusão: Desta vez o modo logarítmico não superestimou os valores extremos talvez por não considerar os valores zeros, mas apresentou resultado um pouco inferior ao modo linear. Este em relação ao resultado anterior pouco va-

riou, indicando que, em média, não considerando os valores zeros, para um evento pluvioso médio, cada grau de aumento da declividade é responsável pelo aumento de 307 kg/km<sup>2</sup>, na média da produção de sedimentos para o período considerado.

Modelos 45 e 46: Não consideram os eventos pluviosos de A1 e B1 cuja produção seja menor que 100 Kg. O modo linear explicou 90% da variação da produção com um EP de 10 t/km<sup>2</sup>. O modo logarítmico explicou a variação de 50% da produção com erro padrão de 11t/km<sup>2</sup>.

Conclusão: O modo logarítmico, embora a eliminação dos valores mínimos de produção, continuou com resultados inferiores ao modo linear. Este manteve quase os mesmos resultados anteriores e, para eventos com produção maior que 100 Kg, estima-se que o aumento de 1 grau na declividade seria responsável, em média, para um evento pluvioso médio, por um aumento de 333 Kg/km<sup>2</sup> na produção média de sedimentos no período.

Modelos 47 e 48: Não consideraram os eventos pluviosos de A1 e B1 com produção inferior a 1 ton.

O modelo logarítmo apresentou maus resultados enquanto no modelo linear os resultados foram muito bons, no mesmo nível dos anteriores.

Conclusão: O modelo logarítmico novamente apresentou resultados inferiores ao modelo linear, embora a eliminação dos eventos que poderiam levar a superestimação da previsão

das produções elevadas. O modelo linear, estima em média, para produções maiores que 1 t o aumento de 406 kg/km<sup>2</sup> na produção média dos sedimentos por grau de aumento na declividade, no período, para um evento pluvioso médio.

Modelos 49 a 50: Considera todos os eventos de A1 e B1, cujas produções sejam maiores que 10 toneladas. O resultado do modo linear explicou a variação 87% da produção com um erro padrão de 17 t/km<sup>2</sup>. O modo logarítmico explicou 74% da variação da produção com erro padrão de 14 t./Km<sup>2</sup>.

Conclusão: Estes modelos tratam quase só dos eventos de grande-produção e por isso um erro padrão maior é aceitável. O modo linear indica que para eventos de produção elevados a variação de um grau nas declividades acarreta, em média, um aumento ou diminuição da produção em 1,2 t/km<sup>2</sup> da produção média do período.

Os modelos lineares, de maneira geral, apresentaram melhores ajustes que os modelos logarítmicos, mesmo não considerando os eventos de pequena produção que acarretavam uma superestimação na previsão feita pelo modo logarítmico para as maiores estimativas.

Os modelos logarítmicos consideram o mesmo peso para todos os eventos, ao contrário dos modelos lineares, que, no ajuste das equações, dão maior importância à influência dos maiores eventos na estimação dos resultados. Por isso, o

modo logarítmico pode levar à superestimação na previsão das grandes produções, porque os eventos extremos são em pequeno número e a lei de variação do modelo é determinada mais em função dos menores valores. Em alguns modelos, porém, não foram considerados os valores pequenos e o modo logarítmico não superestimou os resultados, embora oferecesse resultados inferiores ao modo linear. Isto caracteriza, de um modo geral, a maior aplicabilidade dos modelos lineares para estudos de previsão de sedimentos produzidos em eventos pluviosos isolados.

Nos estudos da influência das declividades estimou-se, em termos médios, um aumento em torno de  $350\text{Kg/Km}^2$  na produção média de sedimentos por grau de declividade das bacias desse tipo. Para eventos extremos, essa variação é de 1,2 ton por grau de declividade. É claro que se trata de uma estimativa superficial, visto as informações disponíveis serem apenas em relação a duas bacias cuja única diferença entre as características físicas é a declividade. Para ter-se melhor estimativa seriam necessárias informações relativas a outras bacias com declividades diferentes destas.

Os modelos seguintes se referem a informações relativas às bacias A1 e A3 cuja única diferença entre suas características físicas é a porcentagem de sua área cultivada. A bacia A1 é totalmente cultivada, enquanto que A3 é totalmente coberta por mato. A bacia A3 não representa um caso ideal para este tipo de comparação porque apresentava estimativas deficientes na precisão dos resultados, conforme cons-

tatou-se anteriormente nos modelos função única dos eventos pluviométricos por bacia. Isto porque a variação da produção de sedimentos de evento para evento, em termos absolutos, é muito pequena, mas em termos percentuais, uma pequena variação absoluta, representa uma grande variação percentual.

Os valores de produção de sedimentos são ínfimos ou nulos quando comparados com os de A1.

Mesmo assim, a título de ilustração, serão apresentados os resultados obtidos.

Modelos 51 e 52: Considerados todos eventos, inclusive com produção zero. O modo linear explicou 73% da variação da produção com erro padrão de  $10 \text{ t/km}^2$ , embora superestimasse alguns dos valores inferiores. O modo logarítmico apresentou previsões irreais superestimando os eventos extremos.

Conclusão: O modo linear previu melhor os eventos de A1, enquanto que, para os eventos de A3, superestimou alguns dos valores. O erro padrão de 10 t pode ser aceitável para as produções de A1, mas para A3 caracteriza a aleatoriedade do seu processo de produção em relação a A1.

Modelos 53 e 54, 55 e 56: Não consideraram os eventos de produção zeros e os menores que 100 Kg, respectivamente. Os modelos lineares tiveram  $\bar{R}^2$  em torno de 0,74, com erro padrão em torno de  $11 \text{ t/km}^2$  superestimando os valores extremos de A3. Os modelos logarítmicos apresentaram resultados não aceitáveis.

Conclusão: Quando eram empregadas as produções zero, o modelo logarítmico superestimava os eventos extremos de A1. Quando não foram considerados estes valores, isto não acontecia, embora os resultados fossem pouco significativos a justando melhor os valores de A3 e caracterizando uma maior a plicabilidade do modo linear da equação. Como ilustração pela análise dos coeficientes, pode-se dizer, a partir do modelo, que cada 1% de mato da área impede em média, a produção de  $120 \text{ Kg/Km}^2$  de sedimentos, para um evento pluvioso médio. Serve apenas como informação da ordem de grandeza por se dispor apenas de 2 sub-bacias.

As influências da declividade e da área cultivada são estudadas conjuntamente a partir das informações de A1, B1 e A3 em um modelo conjunto de previsão de sedimentos produzidos. Entre A1 e B1 a única diferença é a declividade, e entre A1 e A3, a diferença nas características físicas consiste área cultivada. O modelo foi definido em função de um parâmetro representativo do evento pluvioso e da umidade do solo no seu início,  $IFCU(10)$ ; de um parâmetro para declividade e de um parâmetro para a porcentagem de área cultivada. Assim, para um evento pluvioso, se for necessário pre ver a produção de sedimentos de uma determinada bacia com as demais características físicas semelhantes a A1, B1 e A3, bas taria entrar com a sua declividade média e área cultivada no modelo. Mas para as informações disponíveis, o modelo de pre visão estimado, não permitirá, porque dispõe-se até o momento, de poucas bacias experimentais, além de, conforme constatado anteriormente, as informações relativas a bacia A3 são in consistentes por ser totalmente coberta com mata e sua produ

ção quase nula. Os modelos estimados, entretanto, permitem dar uma idéia apenas de como se comportaria o fenômeno.

Modelos 57 e 58, 59 e 60, 61 e 62: Os 57 e 58 consideraram todos eventos. Os 59 e 60 não consideraram os eventos com produção zero. Os 61 e 62, não consideraram produções menores que 100 Kg. Os modelos lineares tiveram bom ajuste explicando quase 80% da variação da produção com erro padrão médio de  $12\text{t/Km}^2$ , superestimando a produção de sedimentos de A3 para os eventos pluviosos extremos. O modelo logarítmico superestimou as produções dos eventos pluviométricos extremos de A1. Quando as produções zero não foram consideradas, o ajuste não superestimou os eventos extremos, apresentando um  $\bar{R}^2$  menor que o modo linear, mas com um erro padrão também menor.

Conclusão: O maior erro padrão do modo linear é devido à superestimação dos eventos extremos de A3. A previsão linear acarreta resultados inconsistentes para a bacia A3, com 100% de área com mato, por se tratar de um caso limite onde a produção é quase nula. Como a previsão depende da chuva, mesmo que 100% da cobertura seja mato, para eventos pluviosos extremos existirá uma superestimação dos resultados.

Em suma, a operação de bacias totalmente cobertas por mato é desnecessária porque se sabe que sua produção é quase nula, logo sem importância para estes tipos de estudo. Uma bacia com pelo menos 20% de área cultivada já apresenta-

rã maior eficiência na determinação de modelos para verificação da influência da porcentagem da área cultivada na variação do processo de produção de sedimentos, com as declividades. Da análise dos coeficientes do modelo de regressão, depreende-se que 1% de área cultivada, em termos médios, acarreta o dobro da produção de sedimentos causadas pelo aumento de um grau de declividade entre duas bacias com características físicas semelhantes, no período de tempo considerado.

**Obs.:** convém lembrar que a única diferença significativa entre as sub-bacias A1 e B1 é a declividade e entre A1 e A3 é a porcentagem da área cultivada. Não foi empregado um parâmetro representativo de solo da região por ser uma constante para as três sub-bacias, principalmente por estarem localizados próximos uma a outra.

Por exemplo, A1 e B1 possuem as mesmas características físicas tal como o mesmo ciclo anual de utilização do solo e o mesmo tipo de preparo da terra. Assim, unicamente a declividade é responsável pelas diferentes produções de sedimentos para uma mesma precipitação.

No caso dos modelos função são do parâmetro de chuva e umidade do solo, a consideração do parâmetro de solo só seria compensador se sua avaliação numérica fosse diferente em cada evento, para uma determinada sub-bacia. Como os resultados do parâmetro IFCU foram excelentes, o parâmetro de solo teria pouca influência ou sensibilidade nos modelos.

## 5. - CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 - Conclusões Finais

### 5.2 - Recomendações

## 5 - CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 - Conclusões finais

O desmatamento e o preparo da terra para o emprego na agricultura afetam os regimes hidrológico e sedimentológico de uma região, provocando a aceleração dos processos de erosão do solo.

A conseqüente produção de sedimentos atinge obras relativas à gestão dos recursos naturais de uma região, assim como leva ao aumento da poluição hídrica e à uma desvalorização das terras empregadas para a agricultura.

O presente trabalho se preocupou com a avaliação quantitativa da produção de sedimentos, o que permitiu as seguintes conclusões:

#### 5.1.1 - Quanto aos parâmetros hidrológicos empregados nos modelos de previsão da produção de sedimentos por evento pluvioso

a) Foram testados nos modelos, principalmente, os seguintes parâmetros hidrológicos: R, fator de energia ciné-

tica da chuva; TP, total precipitado; T30 e T60, intensidades máximas médias de 30 a 60 minutos multiplicados por TP; QS, o escoamento superficial; QP, vazão de pico do evento pluvioso; QSP, produto de QS e QP; IP, índice de precipitações anteriores; VPA, variação da precipitação antecedente; QI vazão de base inicial do evento; e IFCU(I), fator de chuva e umidade do solo corrigido.

Os modelos de melhor ajuste foram definidos unicamente em função do parâmetro proposto IFCU(10), fator de chuva e umidade do solo corrigido, calculado da seguinte maneira:

$$IFCU(10) = R^2 * VPA(10) * FC = FCU(10) * FC$$

onde FCU(10) é o fator de chuva e umidade do solo não corrigido; R é o fator de energia cinética da chuva da Equação Universal de Perda de Solo; VPA(10) é variação da precipitação antecedente, fator indicativo para o teor de umidade do solo no início dos eventos pluviosos, e FC é o fator de correção para o sub-período considerado dentro do ciclo anual de utilização do solo.

O fator VPA(10) é dado por

$$VPA(10) = \sum_{i=10}^1 TP (11-i) * i$$

onde TP é o total precipitado, em mm, no dia (11-i) antecedente ao evento.

O fator de correção FC é dado por:

$$FC = \frac{CMPB}{CMP}$$

sendo

$$CMP = \frac{\sum_{j=1}^n c_j}{n}$$

e

$$c_j = \frac{FCU(10)_j}{Y_j}$$

onde CMP é o coeficiente médio de produção de cada sub-período, dentro do ciclo anual de utilização do solo. Em cada sub-período a apresentação da camada superficial do solo deve variar pouco de maneira que não implique em variação da produção de sedimentos para mesma precipitação e teor de umidade do solo no início dos eventos. O índice j representa um evento qualquer dentro de cada sub-período, sendo  $Y$  a produção específica de sedimentos em  $t/Km^2$ ;  $c$ , o coeficiente de produção e  $n$ , o número de eventos pertencentes a cada sub-período. O fator CMPB é o CMP do sub-período do ciclo anual de utilização do solo tomado como base para determinação de FC. Cada sub-período tem seu FC correspondente.

b) Dentre os parâmetros empregados, em particular, R, VPA, QSP e QI proporcionaram bons resultados aos modelos.

Os parâmetros R e VPA(10), considerados individualmente, são os que melhor representam o evento pluvioso e a umidade do solo no início dos eventos para fins de utilização em modelos de previsão.

Também os parâmetros QSP (representativo para o evento pluvioso) e QI (indicativo da umidade do solo) apresentaram bons resultados. Devido às informações disponíveis, não foi possível determinar com precisão o escoamento superficial ocorrido em cada evento, prejudicando a quantificação de QSP, mas, mesmo assim, demonstrou que pode apresentar bons resultados. A vazão de base no início dos eventos QI, outro parâmetro proposto como fator indicativo para a umidade do solo, apresentou resultados melhores que os demais empregados, embora não se disponha destas informações para todos os eventos, o que não permite maiores conclusões sobre sua utilização nas equações.

Outra observação a ser feita é quanto à introdução nas equações, de um parâmetro adicional indicativo do teor de umidade do solo no início dos eventos, junto com o parâmetro de chuva, o que demonstrou superioridade sobre os modelos função só do parâmetro de chuva.

Estes resultados sugeriram a combinação dos parâmetros R e VPA num fator único, a fim de permitir a aplicação da metodologia definida anteriormente para obter o fator de chuva e umidade do solo corrigido, que apresentou melhores resultados, na comparação com os demais parâmetros empregados.

c) Além da superioridade em relação aos outros testados, o parâmetro hidrológico FCU(10) oferece facilidades para sua utilização em equações de previsão, tais como:

- necessidade unicamente de dados de precipitações para a avaliação numérica do parâmetro;
- ser um único parâmetro representativo do evento pluvioso e do teor de umidade do solo;
- permite somente uma equação da previsão da produção de sedimentos durante o ano inteiro, apesar da existência do ciclo anual de utilização do solô que determina produções diferentes em condições de chuva e umidade do solo semelhantes em duas precipitações.

O emprego de FCU(10), porém sofre as seguintes limitações, que não podem ser perdidas de vista ao querer empregá-lo, como:

- a hipótese da não contribuição da calha na produção não ser satisfeita. Isto é pouco provável, por ser a área da bacia muito pequena, e dentro da macro análise feita, não existir a caracterização de uma rede de drenagem principal. A hipótese da não contribuição da calha também é reforçada pelo fraco resultado apresentado pelo modelo definido somente em função da vazão de pico

do evento pluvioso. Se houvesse contribuição da calha, deveria haver uma melhor correlação entre a vazão de pico do evento pluvioso e a produção de sedimentos, o que não ocorre.

- a extrapolação dos resultados para áreas maiores, não pode ser feita a não ser que se operem bacias maiores, para o estabelecimento da curva da taxa de condução de sedimentos, para a região em questão. Assim, a partir de uma única equação para pequenas bacias, se pode estimar as produções de áreas maiores, dentro dos limites de aplicação da curva.

#### 5.1.2 - Quanto aos modelos de Previsão. Influência das características físicas das bacias e do uso do solo

a) No presente trabalho, devido ao período disponível de informações (1 ano), estabeleceu-se de maneira geral duas épocas de utilização do solo, caracterizadas cada uma pelo grau de proteção da terra. A primeira corresponde ao crescimento e maturação das culturas mais o período em que a terra é abandonada e cresce a vegetação nativa quando o solo está semi-protegido. A segunda época corresponde ao período em que ele está desprotegido, durante a época, principalmente, do preparo do solo ao plantio e da colheita.

Pela correção feita para o fator FCU, estima-se que, em média, a produção de sedimentos da época de solo semi

-protegido cai para aproximadamente 36% da produção efetiva da época de solo desprotegido. Isso para bacia do tipo A1, com 40% de declividade. Quando essa declividade gira em torno dos 25%, a queda é para aproximadamente 60% da produção de sedimentos, de uma época em relação a outra.

b) O modelo de previsão individual, por bacia, função dos eventos pluviosos e umidade do solo de melhor ajuste, foi o da forma  $Y = a + b \text{IFCU}(10)$ . Teve um coeficiente de determinação em torno de 0,98, com um erro padrão da estimativa perto de  $4 \text{ t/km}^2$  para as bacias A1 e B1. Estas equações só podem ser empregadas em condições semelhantes à de sua definição. Para a bacia A1, quase totalmente cultivada e com declividade média de 40%, a equação é a seguinte:

$$Y = -469 + .16 \text{IFCU}(10)$$

Para a bacia B1, também empregada para cultivo, com 25% de declividade média, a equação foi:

$$Y = -1337 + .10 \text{IFCU}(10)$$

onde  $\text{IFCU}(10)$  é o fator de chuva e umidade do solo corrigido e Y, a produção específica efetiva de sedimentos, em  $\text{kg/km}^2$ .

Para a bacia A3, os resultados não foram satisfatórios por que a produção de sedimentos é muito pequena. Assim, a variação da produção, em termos absolutos, pode representar uma grande variação porcentual que os parâmetros repre -

sentativos das chuvas não conseguem explicar. A produção em A3 pode ser considerada nula e mesmo que ocorra, por ser de pequena monta, não tem significado prático algum.

c) Os modelos de previsão conjuntos entre A1 e A3, para verificar a influência da porcentagem de área cultivada no processo de erosão, ficaram prejudicados porque a bacia A3, conforme dito acima, é um caso limite, com 100% de sua área coberta com mato, onde a produção de sedimentos é quase nula, principalmente comparando com as produções de A1, o que acarretará superestimções na previsão da produção em eventos pluviosos extremos, para bacias do tipo A3 ou em condições próximas. Mesmo assim, em termos médios, a análise dos coeficientes permite dizer que, para um evento pluvioso médio, a diminuição em 1% da área cultivada reduz a produção de sedimentos em  $120 \text{ kg/km}^2$  nas bacias com as características físicas semelhantes a A1 e A3, no período de tempo considerado.

d) Os modelos de previsão conjuntos de A1 e B1 permitem analisar a influência da declividade no processo de erosão do solo. Apresentaram bons resultados com um coeficiente de determinação de 0,9, com um erro padrão em torno de  $9 \text{ t/Km}^2$ . Podem ser empregados em previsões para bacias com características físicas semelhantes a A1 e B1, embora com declividades diferentes. Como na estimação do modelo foram utilizadas informações relativas a somente duas bacias de declividades diferentes, os resultados não devem ser considerados

como previsão, mas, sim, como estimativa de quanto poderia ser a produção de sedimentos para aquela declividade a partir da ocorrência de determinado evento pluvioso. Ainda, pela análise dos coeficientes da equação, pode-se estimar que cada grau a menos na declividade de uma bacia, com características físicas semelhantes a A1 e B1, provoca, em média, para um evento pluvioso médio, uma diminuição de  $250 \text{ kg/km}^2$  na produção de sedimentos, considerando todos os eventos. Para os eventos extremos, cada grau a menos de declividade, em média, impede, para um evento pluvioso médio,  $1,2 \text{ t/km}^2$  na produção média de sedimentos.

e) Os modelos com informações das bacias de A1, B1 e A3 em conjunto foram estimados para previsão de sedimentos produzidos a partir da declividade e porcentagem de área cultivada de uma bacia com as demais características físicas semelhantes a A1, B1 e A3. Devido a produções de A3 serem muito pequenas, quase nulas em comparação as de A1 e B1, a equação superestima os resultados da previsão, para bacias com quase totalidade da área coberta com mata nos eventos pluviosos extremos. Apesar da equação não ser confiável pode-se ter uma idéia de quanto poderia ser a produção de sedimentos quando mais de 50% da área de uma bacia for cultivada.

## 5.2 - Recomendações

### 5.2.1 - Quanto à metodologia

a) Todos os linígrafos e pluviógrafos, empregados na operação das bacias estudadas, devem permitir a leitura das informações em intervalos de tempo de 10 min a fim de permitir a determinação do escoamento superficial ocorrido em cada evento através do balanço hídrico simulado por um modelo semi-conceitual determinístico pluvio-hidrométrico. A aplicação desse modelo também será necessário, durante o prosseguimento das pesquisas na área, para determinação de um modelo semi-conceitual determinístico de previsão de sedimentos.

b) Pode-se melhorar o sistema de medição dos sedimentos em suspensão de maneira que seja possível a medição das concentrações até o segundo pico do hidrograma da onda de cheia, se houver. Isto será possível se colocar a caçamba responsável pela liberação dos bocais das garrafas coletoras abaixo da lâmina d'água a partir do qual se quer medir a concentração de sedimentos na segunda elevação do nível. Também é aconselhável desenvolver um equipamento coletor de sedimentos em suspensão que utilize como referência uma base de tempo fixa para ser empregado em paralelo com o atual.

c) Deve-se reforçar o procedimento já empregado atualmente de proceder a limpeza das barragens de retenção dos sedimentos produzidos por arraste imediatamente após a ocorrência dos eventos. Assim haverá um tempo maior para encher os reservatórios de tranquilização das referidas barragens que proporcionará uma maior precisão nos valores da vazão de base inicial para o próximo evento pluvioso.

d) Como o cronograma anual de utilização do solo pode variar um pouco de ano para ano e de região para região, também é aconselhável que, na mesma planilha de medição dos sedimentos no campo, seja registrado o estado atual de proteção do solo, a fim de evitar erro na avaliação dos parâmetros empregados na determinação das equações de previsão.

#### 5.2.2 - Quanto à Continuidade

a) É necessário o estudo de parcelas experimentais para verificar a produção de sedimentos em termos brutos. Essas parcelas poderiam ser definidas e operadas no campo ou em laboratórios com condições simuladas de solo, cobertura vegetal, declividades e precipitações. As informações de produção bruta, daí advindas, poderiam auxiliar na determinação de curva da taxa de condução de sedimentos para as bacias. A determinação da produção bruta também serve como informação básica à determinação de modelos semi-conceituais determinís

ticos. Com isso sabe-se qual a disponibilidade de sedimentos a serem transportados pelo escoamento superficial. Se a disponibilidade de sedimentos for maior que a capacidade de transporte do escoamento, este escoamento transportará a sua capacidade máxima prevista pelas equações de transporte. Se a disponibilidade de sedimentos for menor que a capacidade de transporte do escoamento superficial, ela transportará to da a produção bruta de sedimentos ocorrida.

b) O fator diretamente responsável pela produção de sedimentos é o preparo do solo para a semeadura pela desagregação e pulverização da terra nos meses de setembro, outubro e novembro. Em decorrência, é conveniente a adoção de práticas para a conservação dos solos como o plantio direto ou cultivo mínimo.

Logo, uma experiência a ser realizada seria o estudo de uma parcela no campo cujo leito de semeadura fosse preparado com as práticas de plantio direto ou cultivo mínimo. Outra parcela deveria ser preparada com cultivos idênticos aos usados atualmente. Deste modo, pode-se fazer uma análise quantitativa da relação entre a produção de sedimentos e medir a eficiência da produtividade em ambas situações, considerando os benefícios líquidos de cada opção alternativa.

c) Continuar a coleta de dados das bacias atualmente em operação a fim de aumentar a série histórica de dados

disponíveis, o que fornecerá maiores informações para o pro  
seguimento das pesquisas. Pelos resultados obtidos nos mode-  
los, chega-se a conclusão que bacias totalmente cobertas com  
mato não tem significado prático algum em termos sedimentoló  
gicos, pela produção quase nula em relação às bacias cultiva  
das. Entretanto, deve-se trabalhar com uma bacia totalmente  
coberta com vegetação natural que serve de controle para es-  
tudar as variações ocorridas no regime hidrológico, decorren-  
tes dos processos de desmatamento para utilização posterior  
na agricultura. "A priori" é aconselhável a instrumentação e  
operação de bacias totalmente cultivadas com declividades di  
ferentes de A1 e B1. Em segundo lugar, é útil a operação de  
bacias com cobertura mista. (50% cultivada, 50% mato)

d) É necessário, também, a operação de bacias em-  
pregadas para cultivo com maior área para o estabelecimento  
de curvas para a taxa de conduções de sedimentos. Isto permi  
tirá previsões de sedimentos, relativas a uma declividade, pa  
ra bacias maiores, a partir de equações definidas a parcelas  
experimentais ou bacias elementares na Região da Encosta do  
Planalto no Estado do Rio Grande do Sul.

## 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMSON, C.M. 1974. Effects of soil conservation treatment on runoff and sediment loss from a catchment in southwestern New South Wales, Australia. In: PARIS SYMPOSIUM, 1974. Effects of man on the interface of hydrological cycle with the physical environment. Dorking, IAHS. p.105-8.
- ATHESIAN, J.K.H. 1974. Estimation of rainfall erosion index. Journal of the Irrigation and Drainage Division, New York, 100(3):293-307, Sept.
- BOGOLYUBOVA, I.V. & KARASHEV, A.V. 1974. Water erosion and sediment discharge. Soviet Hydrology, Washington 13(3):143-54, May.
- BORDAS, M. 1973. Contributions récentes à l'analyse quantitative du transport solide; rapport générale. In: ASSOCIATION INTERNATIONALE DE RECHERCHES HYDRAULIQUES, 15. Istambul, 1973. Recherche et développement dans l'hydrosphère. Istambul. v.6, p.175-88.
- BORDAS, M.P., TUCCI, C.E.M.; SILVEIRA, R.L. da, SEMMELMANN, F.R.; D'AMICO, J.J. 1981. Regime hidrológico e sedimentológico dos cursos d'água da encosta meridional do derrame basáltico sul-americano: bacia representativa do rio Forqueta (RS). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO EM HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 4. Fortaleza, 1981. Anais ... São Paulo, Associação Brasileira de Hidrologia e Recursos Hídricos. v. 1, p.160-75.
- BORDAS, M.P. & CANALI, G.E. 1980. The influence of land use and topography on the hydrological and sedimentological behaviour of basins in the basaltic region of south Brazil. In: HELSINKI SYMPOSIUM, 1980. The influence of man on the hydrological regime with special reference to representative and experimental basins. s.l., IASH-UNESCO p.55-60.
- CANALI, G.E. 1981. Produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas rurais. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. n.p. Diss. maestr. hidrologia aplicada.

- CHERNYSHEV, Y.P. 1972. Hydrologic characteristics of soil erosion in the Central Che Region. Soviet Hydrology, Washington, 11(4):275-89, July.
- CLARK, C.O. 1945. Storage and the unit hydrograph. Transactions. American Society of Civil Engineers, vol. 110, pp. 1419-1488 apud SHEN, Hsieh Wen, ed. 1976. Stochastic approaches to water resources. Fort Collins. v.2, chap. 21, p.64.
- DRAPER, N.R. & SMITH, H. 1976. Applied regression analysis. New York, John Wiley. 407p.
- ELWEL, H.A. & STOCKING, M.A. 1975. Parameters for estimating annual runoff and soil loss from agricultural lands in Rhodesia. Water Resources Research, Washington, 11(4):601-5, Aug.
- ESTADOS UNIDOS: Department of Agriculture. 1961. Predicting rainfall erosion losses- a guide to conservation planning. (Agriculture Handbook, n.537).
- EZEKIEL, M. & FOX, K.A. 1967. Methods of correlation and regression analysis. 3.ed. New York, John Wiley. 548p.
- FLAXMAN, E.M. 1972. Predicting sediment yield in Western United States. Journal of the Hydraulics Division, New York, 98(10):2073-85, Dec.
- FOURNIER, F. 1975. Erosion du sol dans l'espace rural. Hydrological Sciences Bulletin, Wallingford, 20(1):113-6, Mar.
- FRANK, Charles R., Jr. 1971. Statistics and econometrics. New York, Holt, Rinehart and Winston. 400p.
- FREUND, John E. 1973. Modern elementary statistics. 4.ed. Englewood Cliffs, Prentice-Hall. 532p.
- GOTTSCHALK, Louis C. 1964. Sedimentation; part 1: reservoir sedimentation. In: CHOW, Ven Te, ed. 1964. Handbook of applied hydrology. New York, McGraw-Hill. Section 17-1.
- GRAF, Walter Hans. 1971. Hydraulics of sediment transport. New York, McGraw-Hill. 513p.
- GUY, H.P. & JONES, D.E. 1972. Urban sedimentation - in perspective. Journal of Hydraulics Division, New York, 98(12):2099-116, Dec.
- HARLIN, J.M. 1978. Reservoir sedimentation as a function of precipitation variability. Water Resources Bulletin, Minneapolis, 14(6):1457-65, Dec.

- KUESTER, James L. & MIZE, Joe H. 1973. Optimization techniques with Fortran. New York, McGraw-Hill. 500p.
- LAURSEN, E.M. 1956. The application of sediment transport mechanisms to stable channel design. Journal of the Hydraulics Division, vol. 82(4) apud SHEN, Hsieh Wen, ed. 1971. River mechanics. Fort Collins. chap. 11-30.
- LAURSEN, Emmett M. 1958. The total sediment load of streams. Journal of the Hydraulics Division, New York, 84(1):1530-1-36, Feb.
- LOPES, Vicente Lúcio & SRINIVASAN, Vajapeyam S. 1981. Erosão superficial e produção de sedimentos pelas chuvas: o estado de conhecimento e perspectivas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS 4., Fortaleza, 1981. Anais... São Paulo, Associação Brasileira de Hidrologia e Recursos Hídricos. v.1, p.228-44.
- LI, R.M. 1974. Mathematical modeling of response from small watershed. Fort Collins, Colorado State University. 212p. Tese (Ph.D).
- MADEREY, L.E.. 1974. Necesidad de una planeación del uso del agua y del suelo en el Estado de Tlasecala. Recursos Hidráulicos, México, 3(1):100-22, Jan.
- OGROSKY, Harold O. & MOCKUS, Victor. 1964. Hydrology of agricultural lands. In: CHOW, Ven Te, ed. 1964. Handbook of applied hydrology. New York, McGraw-Hill. Section 21.
- RAKOCZI, L. 1975. Effects of man on sedimentation and erosion in rural environments. Hydrological Sciences Bulletin, Wallingford, 20(1):103-12, Mar.
- RICE, R.M. & FOGGIN III, G.T. 1971. Effect of high intensity storms on soil slippage on mountainous watersheds in Southern California. Water Resources Research, Washington, 7(6):1485-96, Dec.
- SELBY, M.J. 1972. The relationships between land use and erosion in the Central North Island, New Zealand. Journal of Hydrology, Dunedin, 11(2):73-87, Nov.
- SELBY, M.J. & HOSKING, P.J. 1973. The erodibility of pumice soils of the North Island, New Zealand. Journal of Hydrology, Dunedin, 12(1):32-56, Dec.

- SEMMELMANN, Franz R.; BORDAS, Marc; CANALI, Gilberto E.; CRUZ, Fernando Dias da. 1978. Proteção contra sedimentos nas bacias meridionais do derrame basáltico sul-americano; pesquisa C. In: BORDAS, Marc P., coord. Pesquisas aplicadas sobre uso e conservação dos recursos hídricos do Rio Grande do Sul; relatório final. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. v.5.
- SHEN, Hsieh Wen, ed. 1971. River mechanics. Fort Collins. 2v.
- SIMONS, Daryl B. & SENTURK, Fuat. 1977. Sediment transport technology. Fort Collins, Water Resources Publications. 807p.
- SNEDECOR, George W. & COCHRAN, William G. 1974. Statistical methods. 6.ed. Ames, Iowa State University. 593p.
- UMEZAWA, P.K. 1979. Previsão de deplúvio (washload) em rios de áreas elevadas. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. 217f. Diss. (mestr. hidrol. apl.) UFRGS - Curso Pós-Grad. Hidrol. Apl., Porto Alegre, BR-RS, 1979.
- WILLIAMS, J.R. & BERNDT, H.D. 1972. Sediment yield computed with universal equation. Journal of the Hydraulics Division, New York 98(12):2087-98, Dec.
- WILLIAMS, J.R. 1974. Predicting sediment yield frequency for rural basins to determine man's effect on long-term sedimentation. In: PARIS SYMPOSIUM, 1974. Effects of man on the interface of hydrological cycle with the physical environment. Dorking, IAHS. p.105-8.
- WISCHMEIER, W.H. 1959. A rainfall erosion index for a universal soil loss equation. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 23, pp.246-249 apud SHEN, Hsieh Wen, ed. 1976. Stochastic approaches to water resources. Fort Collins. v.2, chap.21
- WISCHMEIER, W.H. 1972. Estimating the cover and management factor for undisturbed areas. Paper presented at the Sediment Yield Workshop, USDA Sed. Lab., Oxford, Mississippi apud SHEN, Hsieh Wen, ed. 1976. Stochastic approaches to water resources. Fort Collins. v.2, chap. 21, p.68.
- WISCHMEIER, Walter H. & SMITH, D. Wight D. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. Transactions. American Geophysical Union, Washington, 39(2):285-91, Apr.
- WOLMAN, M.G. 1975. Erosion in the urban environment. Hydrological Sciences Bulletin, Wallingford, 20(1):117-25, Mar.

YAMAMOTO, T. & ANDERSON, H.W. 1973. Splash erosion related to soil erodibility indexes and other forest soil properties in Hawaii. Water Resources Research, Washington 9(2) 336-45, Apr.

## 7 - A N E X O S

7.1 - ANEXO A: Mapas e Fotos relativos à região do estudo

7.2 - ANEXO B: Figuras e Tabelas da Equação Universal de Perda do Solo

A N E X O A

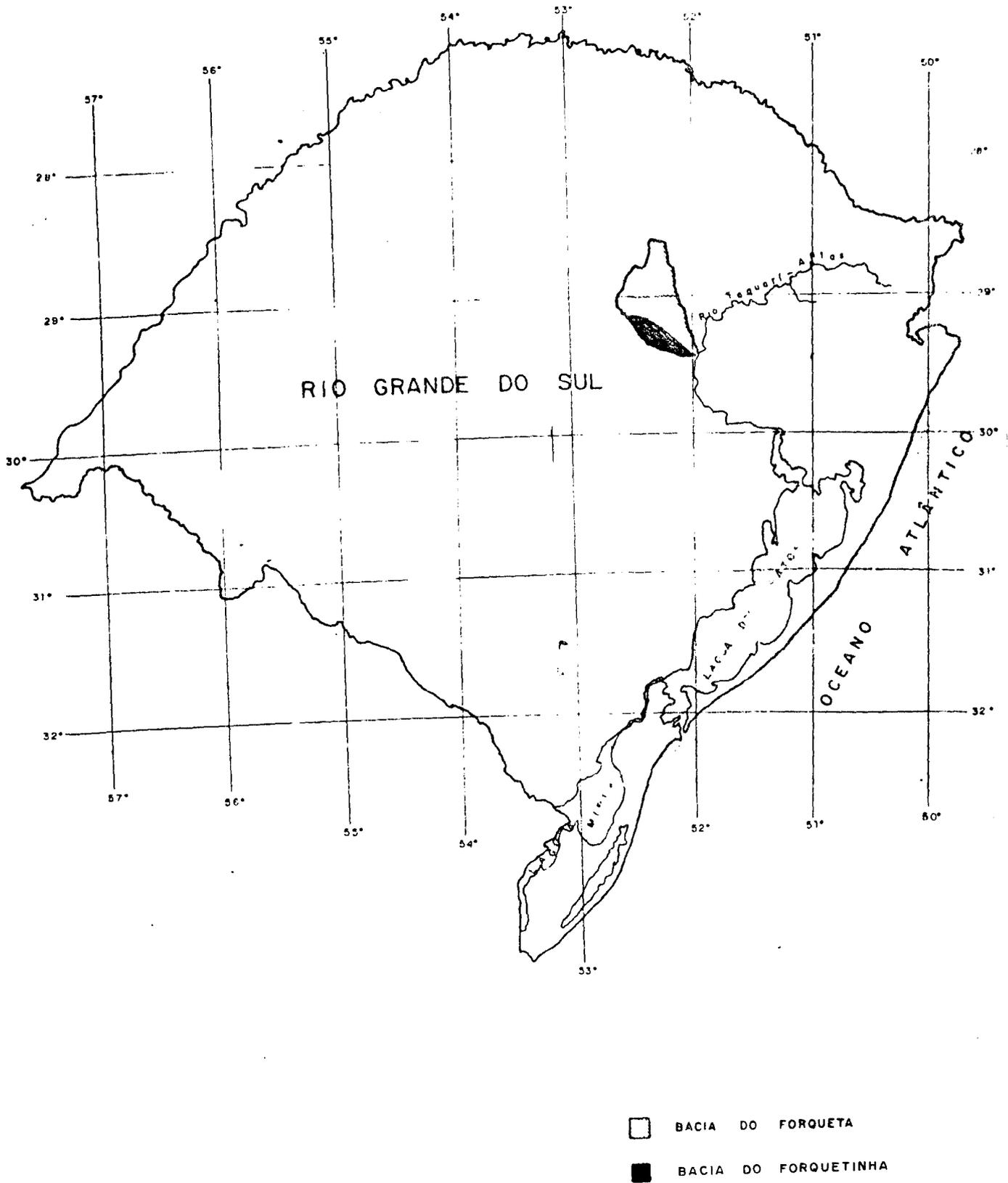
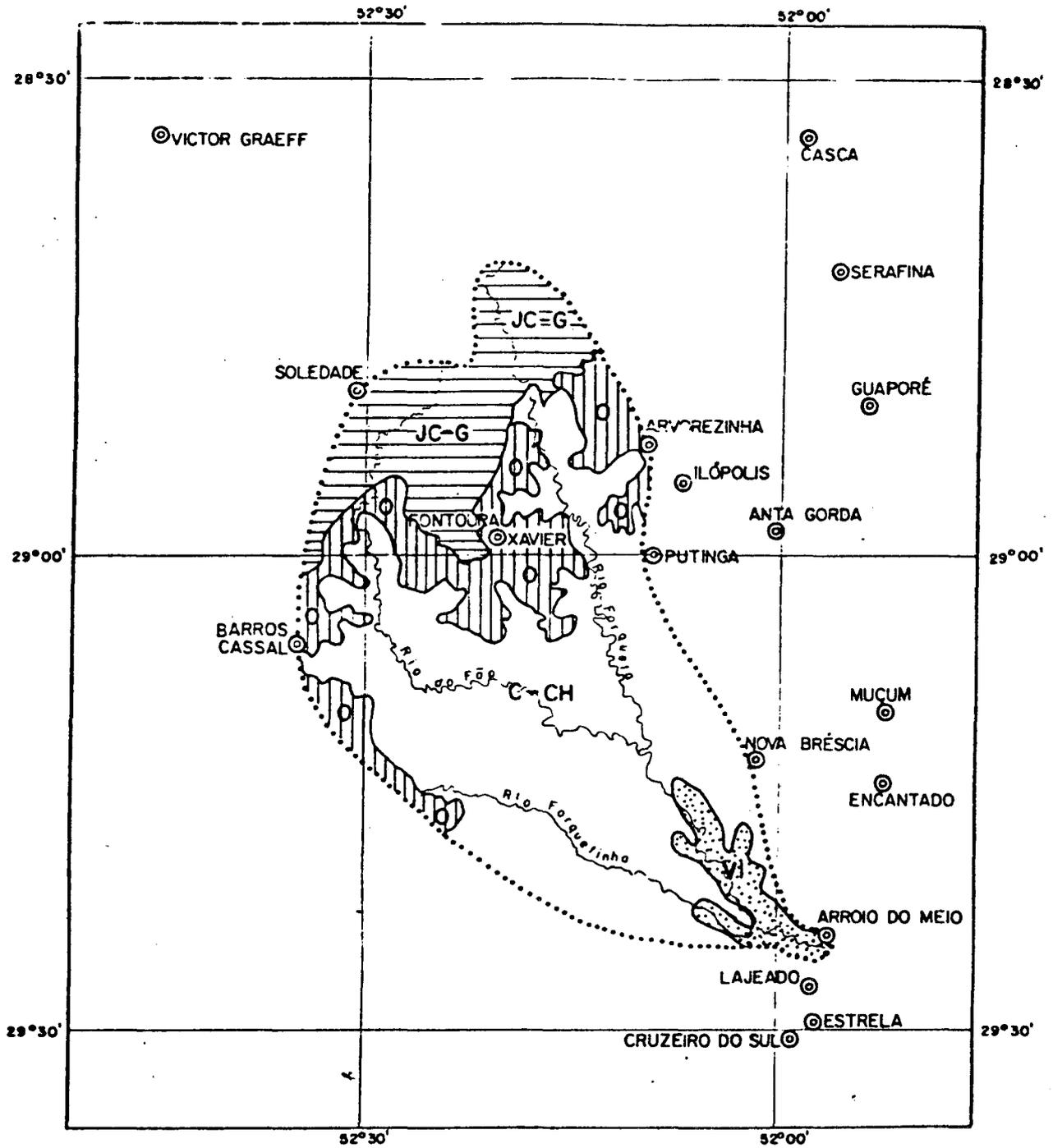


FIGURA A.1 - SITUAÇÃO GEOGRÁFICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO FORQUETA





-  - UNIDADE de MAPEAMENTO VILA
-  - ASSOCIAÇÃO CIRIACO-CHARRUA
-  - UNIDADE de MAPEAMENTO OÁSIS
-  - ASSOCIAÇÃO JULIO de CASTILHOS-GUASSUPI

FIGURA A.3 - SOLOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO FORQUETA

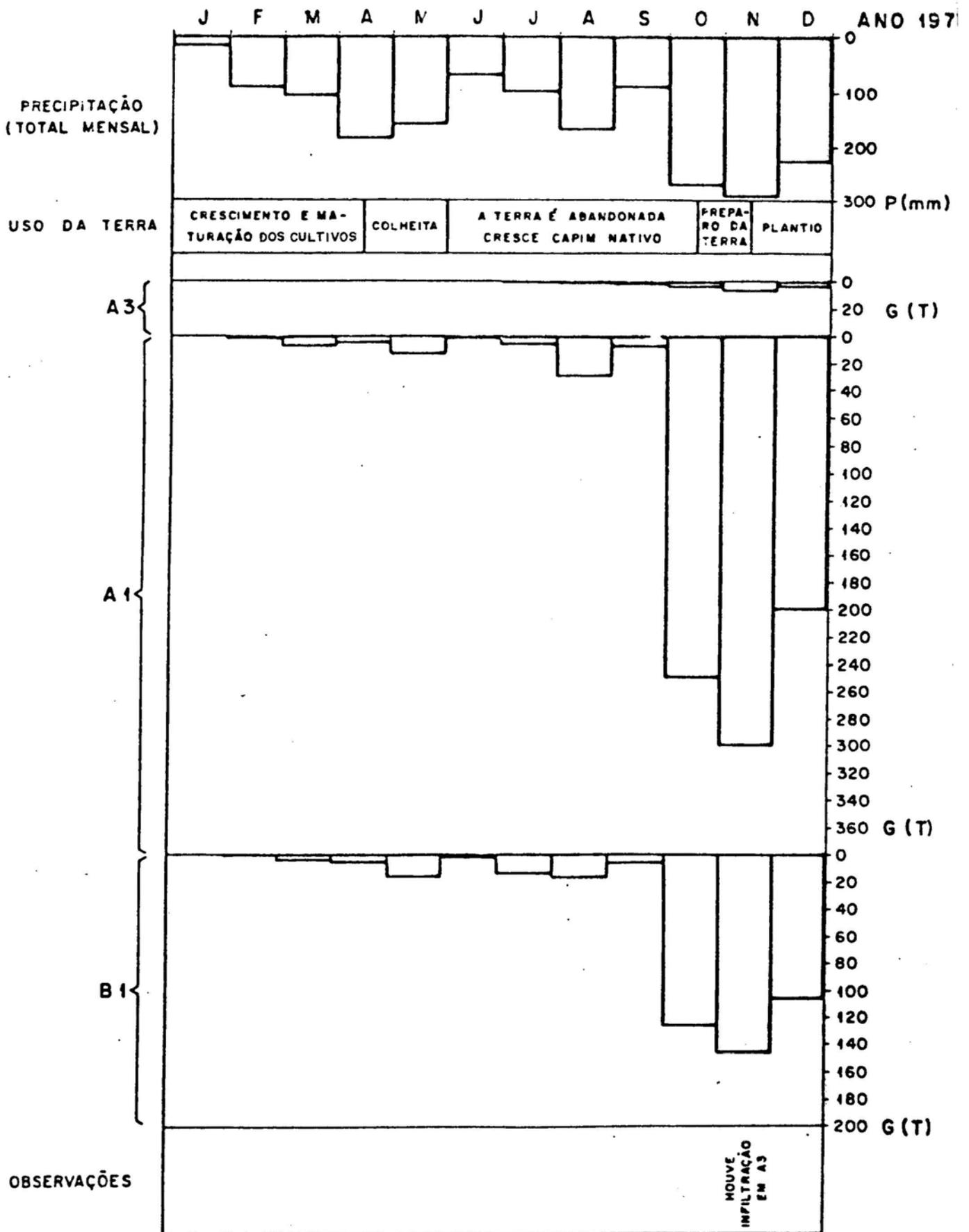


FIGURA A.4 - HISTOGRAMA: PRECIPITAÇÃO MENSAL x SEDIMENTOS PRODUZIDOS

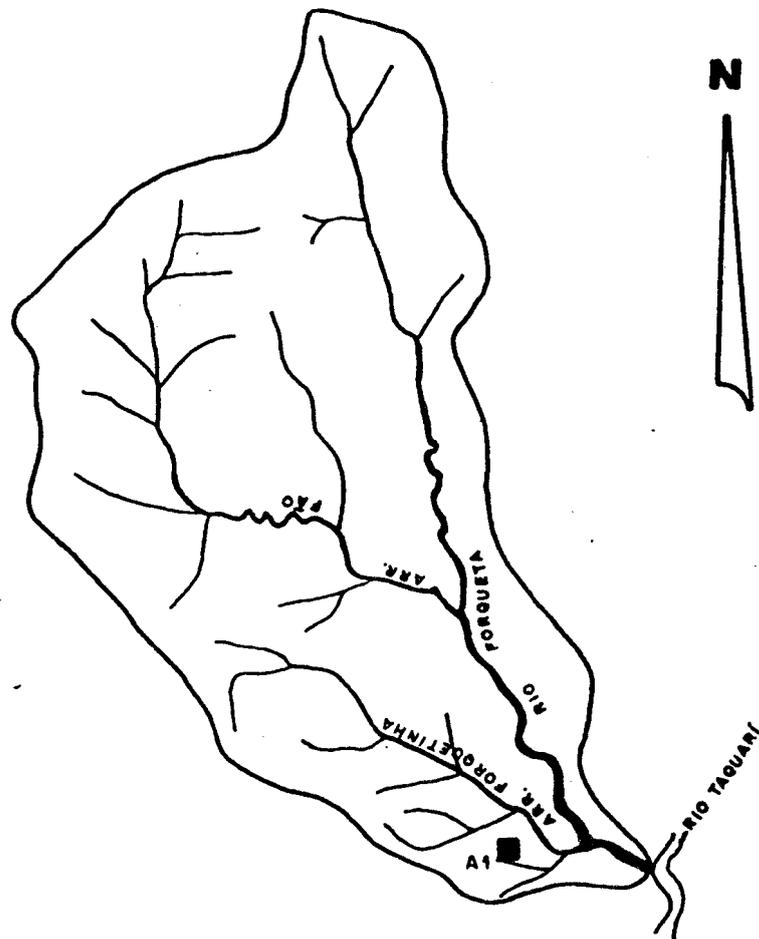


FIGURA A.5 - LOCALIZAÇÃO DA ESTRUTURA A1 NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO FORQUETA

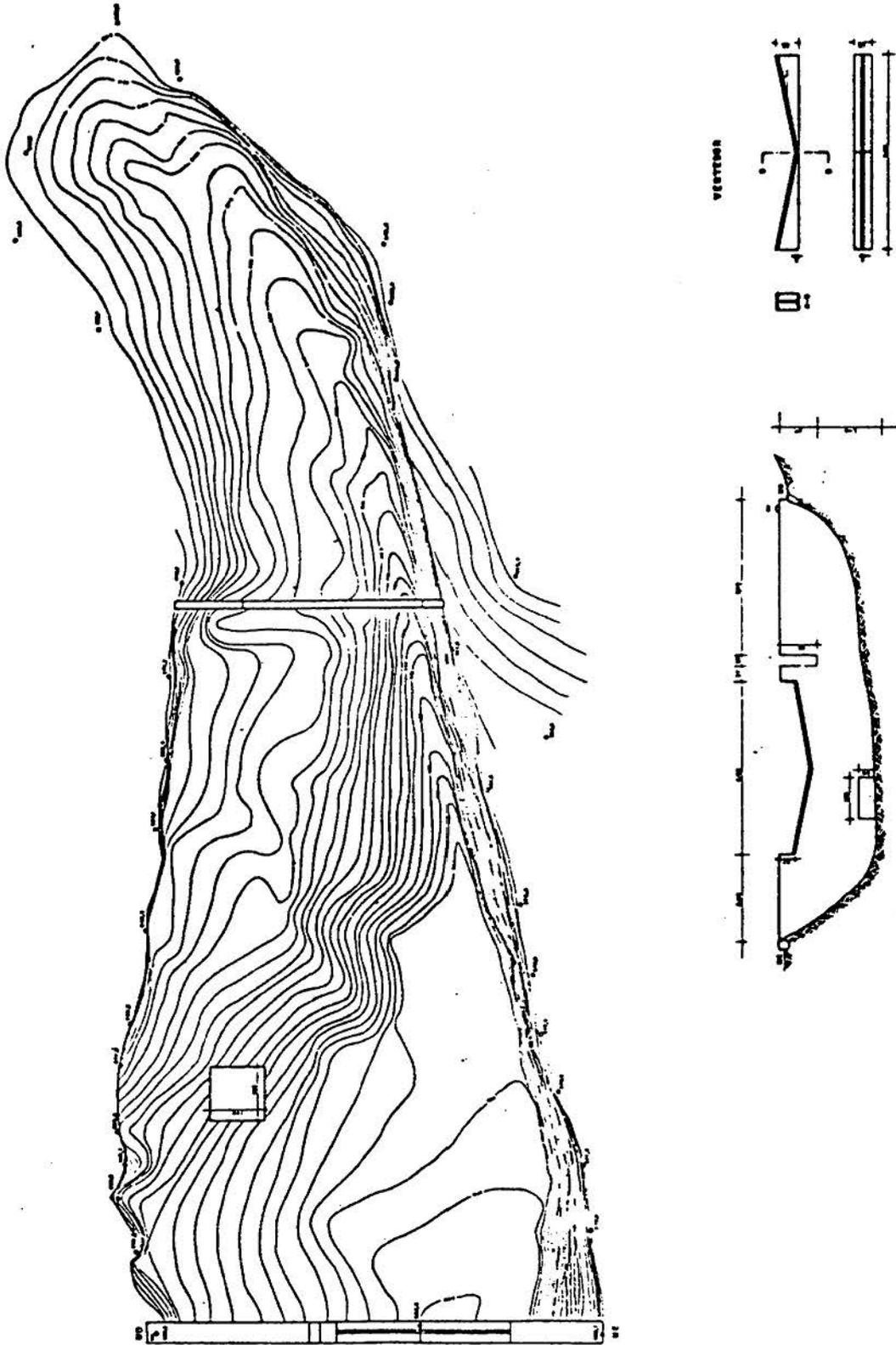


FIGURA A.6 - ESTRUTURAS DE MEDIÇÕES SEDIMENTOMÉTRICAS DA SUB-BACIA A1

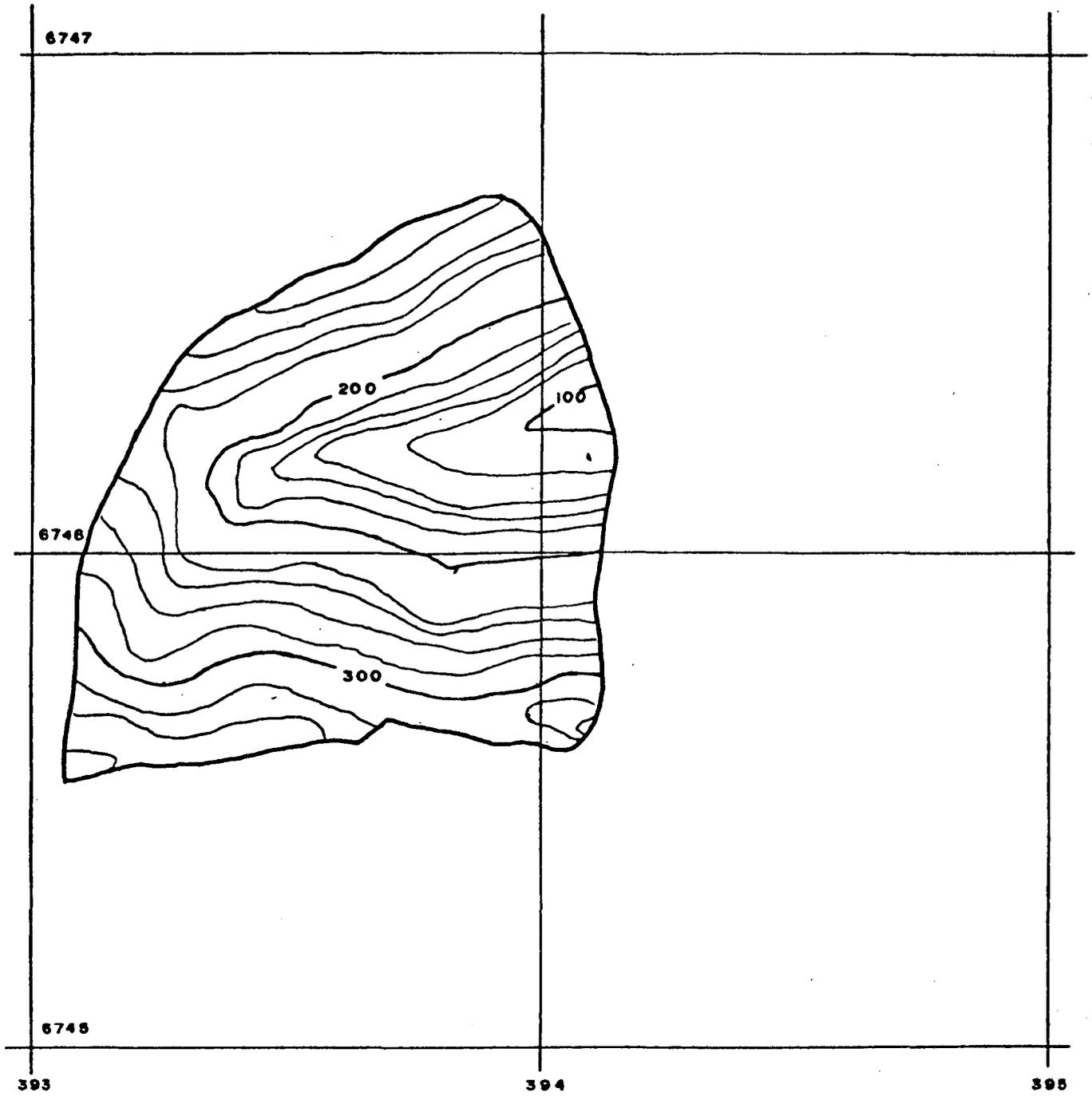


FIGURA A.7 - SUB-BACIA PILOTO A1

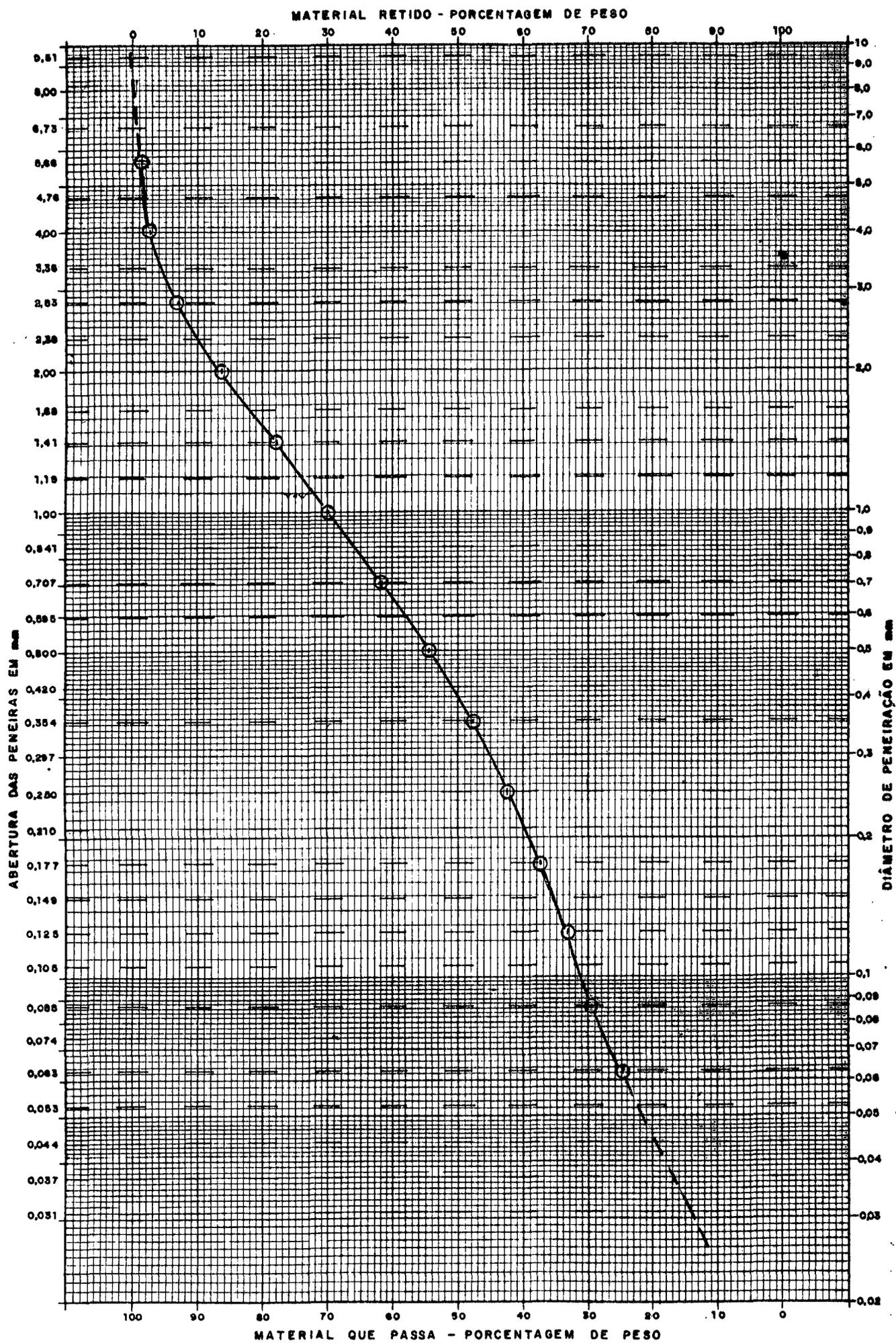


FIGURA A.8 - CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL DE APÓSTE, EVENTO 3, SUB-BACIA A1



FOTO Nº 1 - VISTA AÉREA DA SUB-BACIA A1



FOTO Nº 2 - ESTRUTURA DE COLETA DE INFORMAÇÕES HIDROMÉTRICAS E SEDIMENTOMÉTRICAS DA SUB-BACIA A1

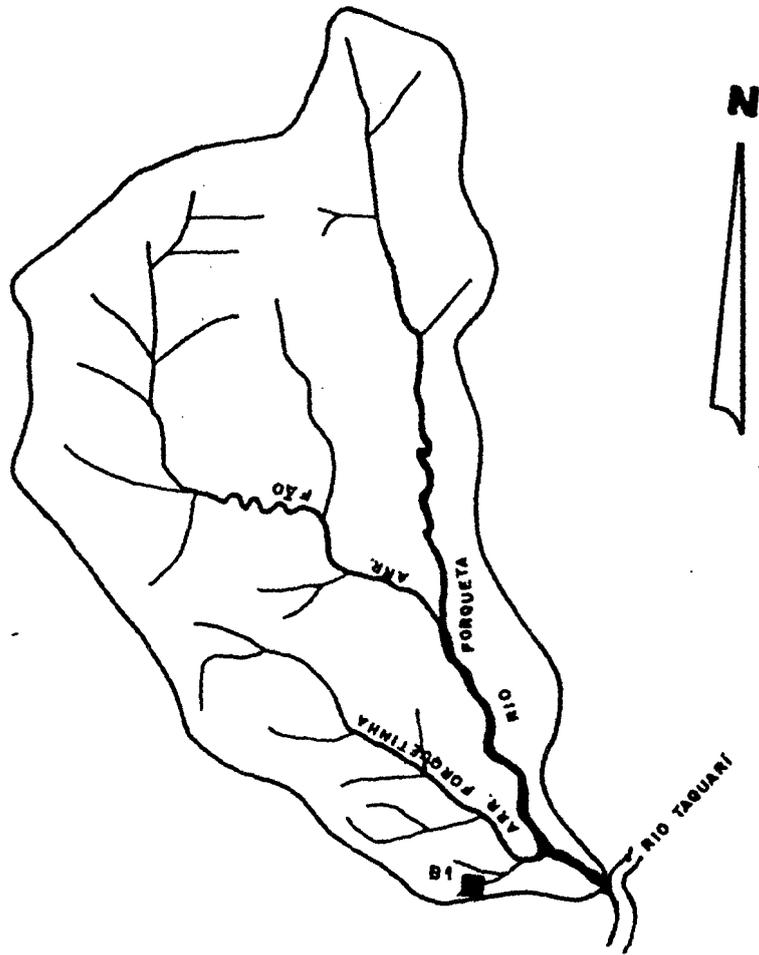


FIGURA A.9 - LOCALIZAÇÃO DA ESTRUTURA B1 NA BACIA DO RIO FORQUETA.

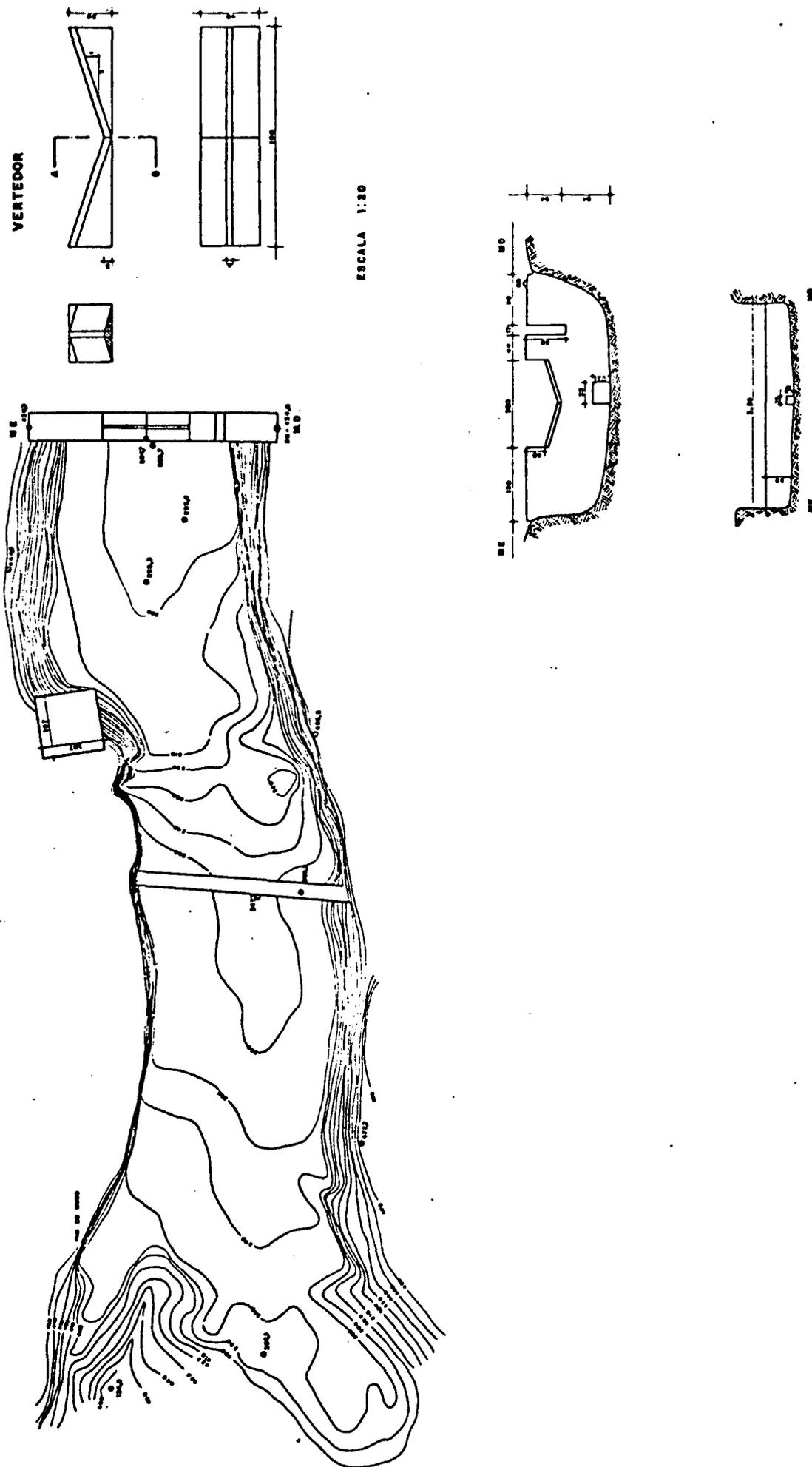


FIGURA A.10 - ESTRUTURA DE MEDIÇÕES SEDIMENTOMÉTRICAS DA SUB-BACIA B1

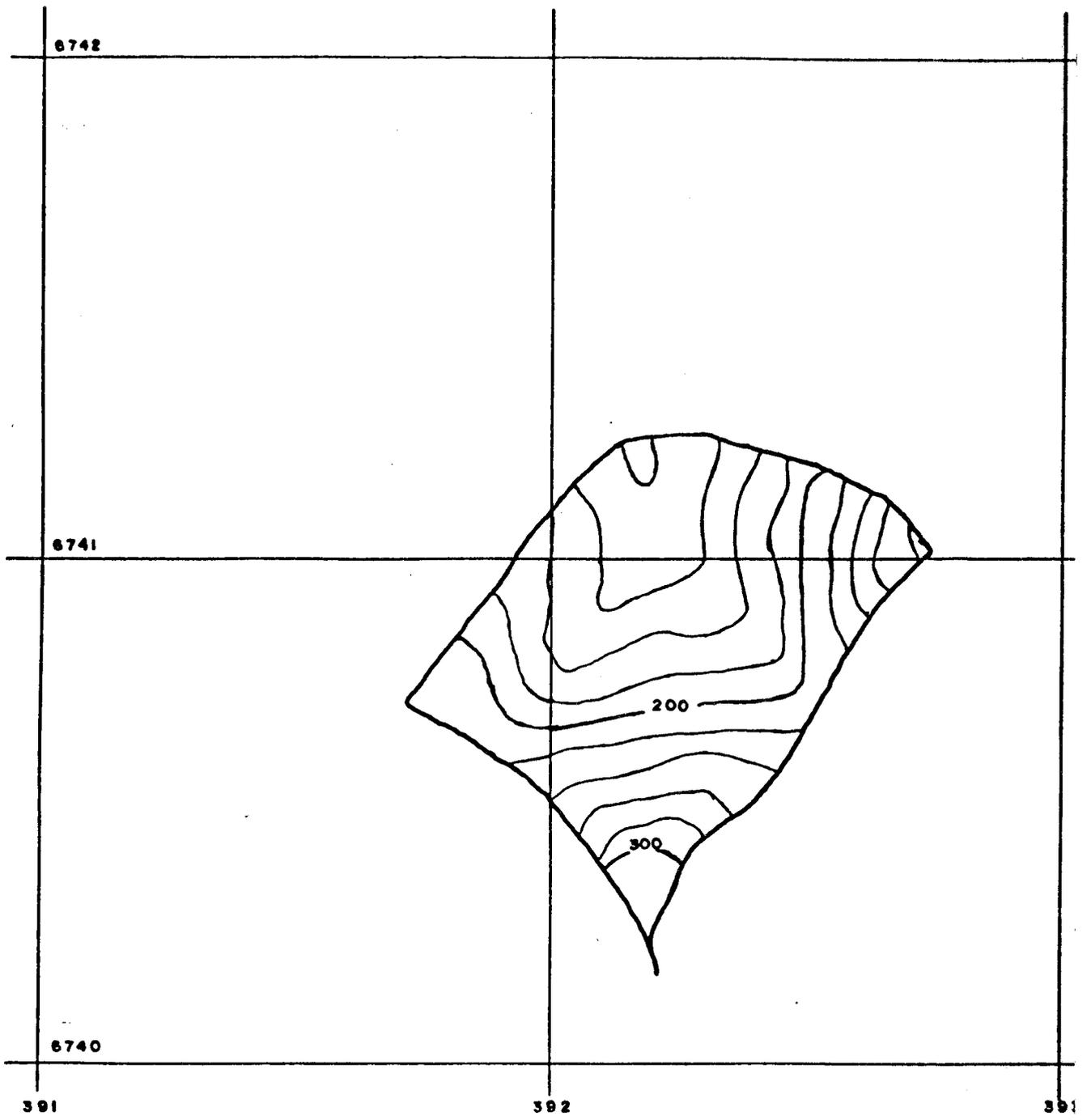


FIGURA A.11 - SUB-BACIA PILOTO B1



FOTO Nº 3 - VISTA AÉREA DA SUB-BACIA B1



FOTO Nº 4 - ESTRUTURA DE COLETA DE INFORMAÇÕES HIDROMÉTRICAS E SEDIMENTOMÉTRICAS DA SUB-BACIA B1

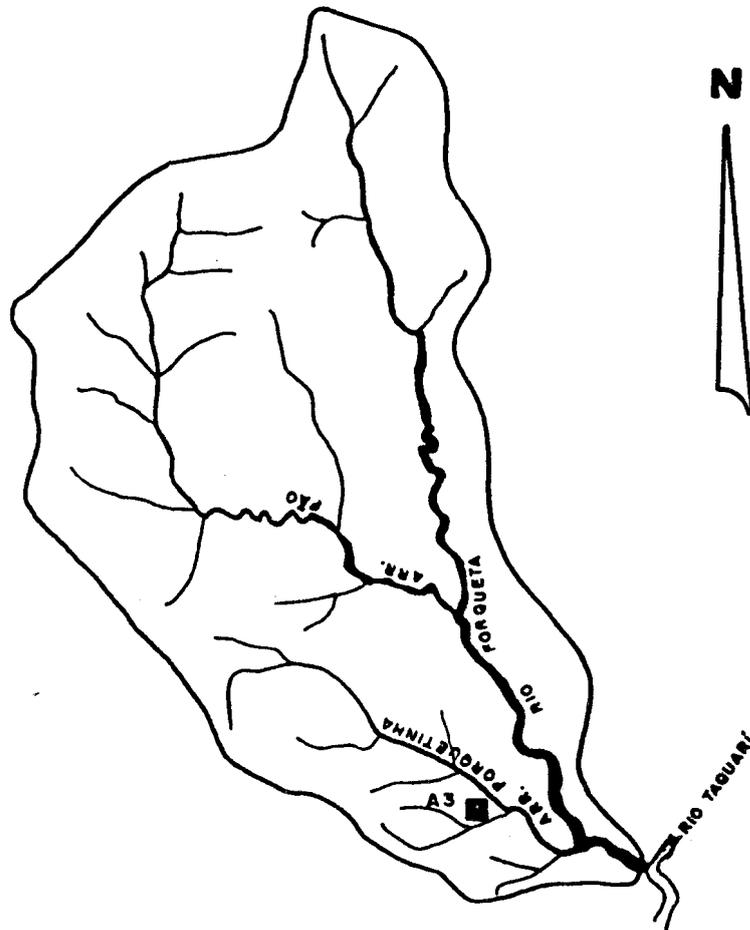


FIGURA A.12 - LOCALIZAÇÃO DA ESTRUTURA A3 NA BACIA DO RIO FORQUETA

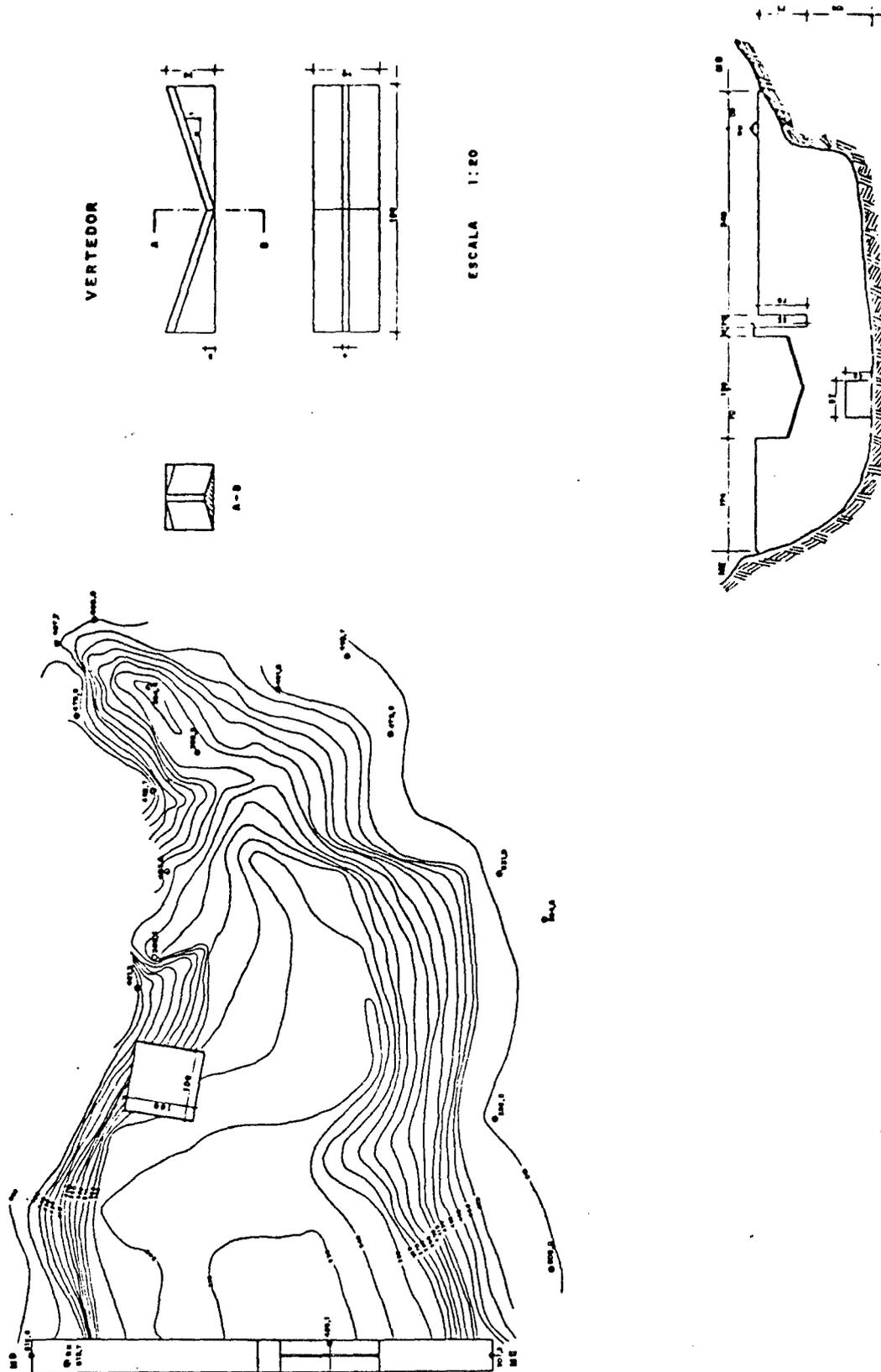


FIGURA A.13 - ESTRUTURA DE MEDIÇÕES SEDIMENTOMÉTRICAS NA SUB-BACIA A3

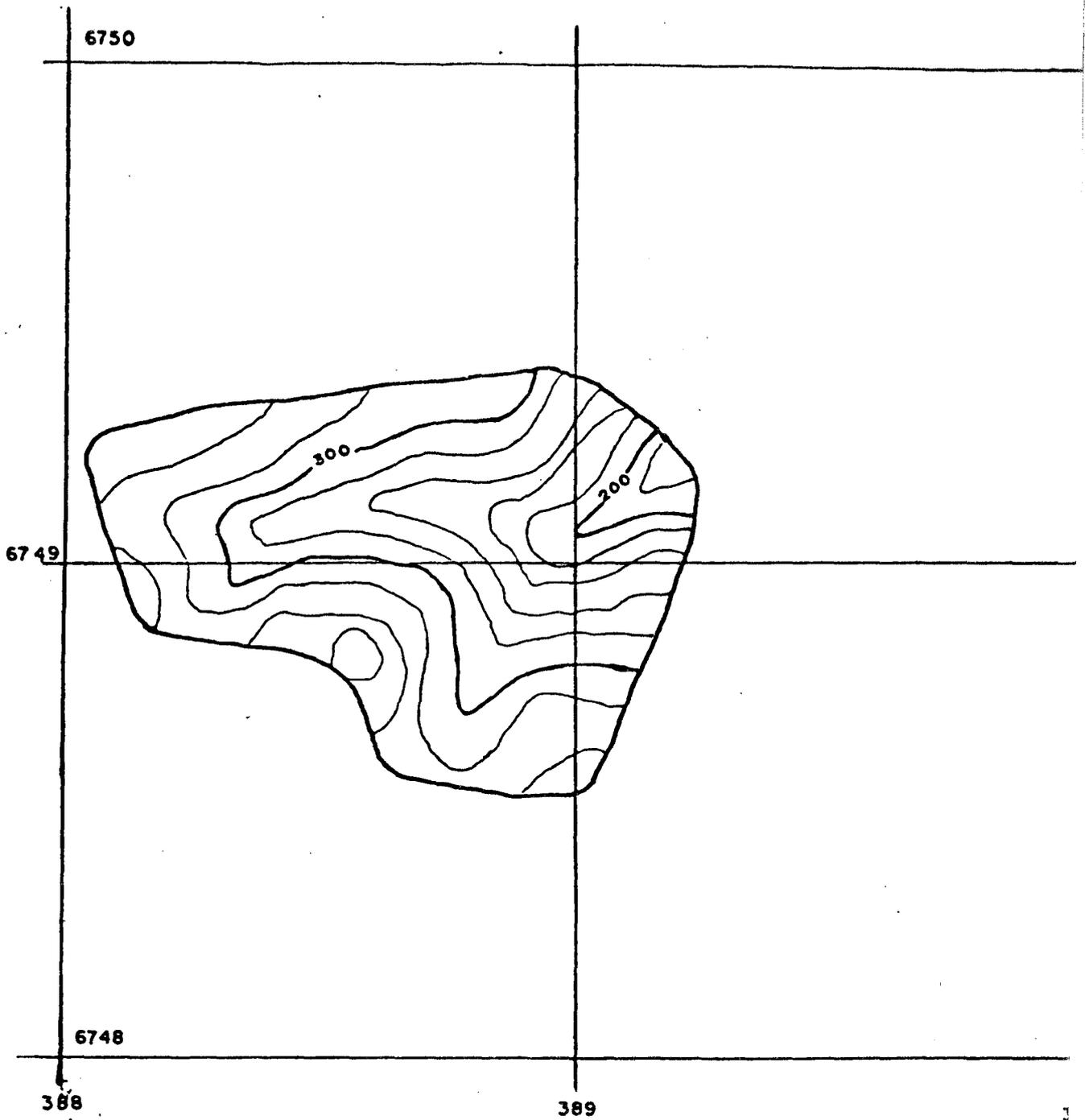


FIGURA A.14 - SUB-BACIA PILOTO A3



FOTO Nº 5 - VISTA AÉREA DA SUB-BACIA A3



FOTO Nº 6 - ESTRUTURA DE COLETA DE INFORMAÇÕES HIDROMÉTRICAS E SEDIMENTOMÉTRICAS DA SUB-BACIA A3

A N E X O B

Ref.: ESTADOS UNIDOS: Department of Agriculture, 1961.  
Predicting rainfall erosion losses. Table 10.

TABELA B.1 - FATOR C PARA ÁREA CULTIVADA

Tipo e Altura		Coberturas em contato com a superfície do solo						
		% de cobertura Tipo	0	20	40	60	80	95+
Cobertura pouco significativa		G	0.45	0.20	0.10	0.042	0.013	0.003
		W	.45	.24	.15	.091	.043	.011
Ervas daninhas altas ou capoeira curta com altura média de queda da gota de chuva menor que 7,62 cm	25	G	.36	.17	.09	.038	.013	.003
		W	.36	.20	.13	.083	.041	.011
	50	G	.26	.13	.07	.035	.012	.003
		W	.26	.16	.11	.076	.039	.011
	75	G	.17	.10	.06	.032	.011	.003
		W	.17	.12	.09	.068	.038	.011
Bastante capoeira ou arbustos com altura média de queda da gota da chuva de 16,51 cm	25	G	.40	.18	.09	.040	.013	.003
		W	.40	.22	.14	.087	.042	.011
	50	G	.34	.16	.08	.038	.012	.003
		W	.34	.19	.13	.082	.041	.011
	75	G	.28	.14	.06	.036	.012	.003
		W	.28	.17	.12	.078	.040	.011
Árvores com pouca capoeira baixa. Altura média de queda da gota de chuva de 33,02 cm	25	G	.42	.19	.10	.041	.013	.003
		W	.42	.23	.14	.089	.042	.011
	50	G	.39	.18	.09	.040	.013	.003
		W	.39	.21	.14	.087	.042	.011
	75	G	.36	.17	.09	.039	.012	.003
		W	.36	.20	.13	.084	.041	.011

G significa que a cobertura da superfície é de grama, plantas gramíneas, material grosseiro compactado em apodrecimento.

W significa que a cobertura da superfície é, em grande parte de plantas herbáceas, com folhas largas (como ervas daninhas com pouca rede de raízes laterais próximo à superfície) ou resíduos não apodrecidos ou ambos.

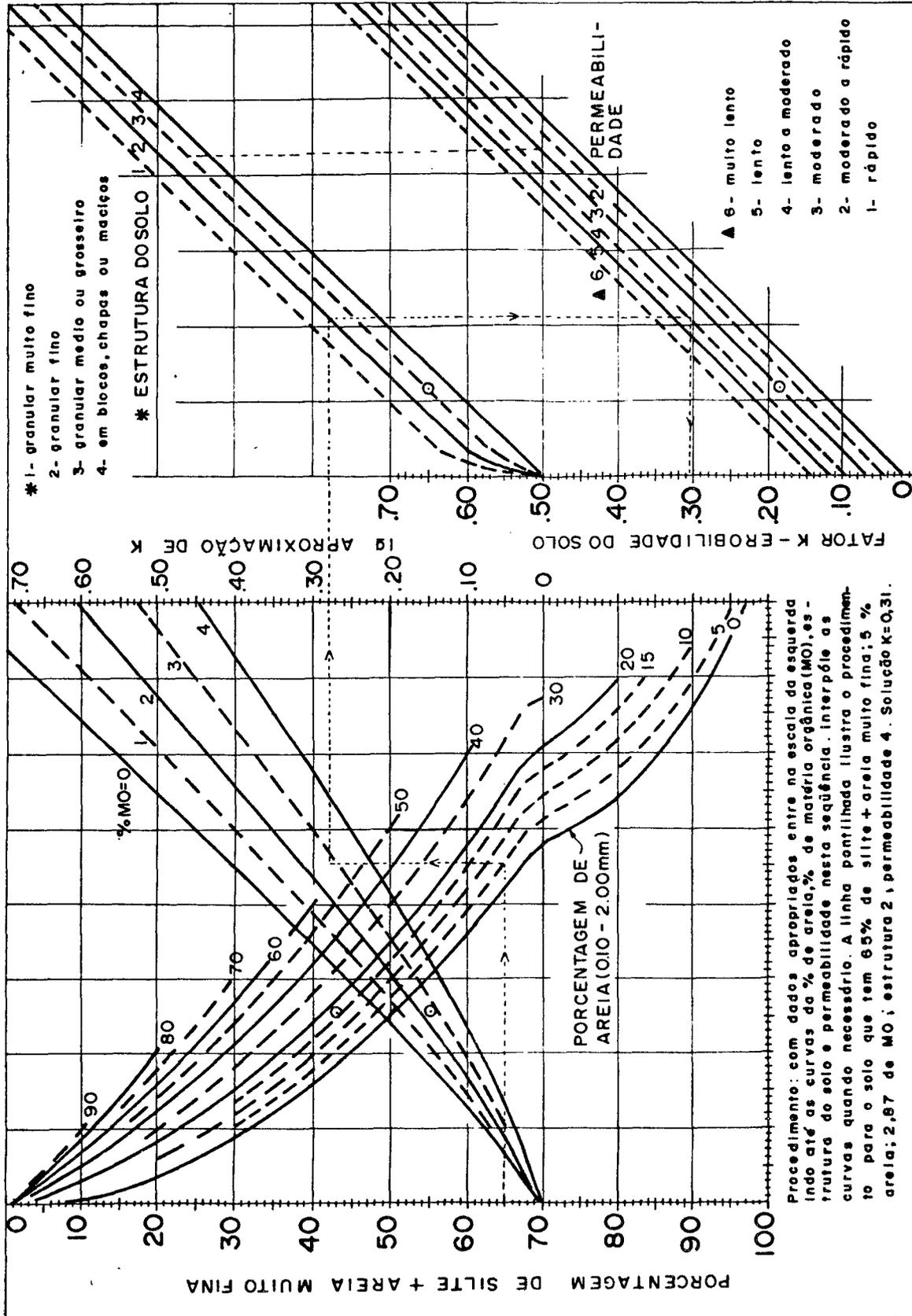
Ref.: ESTADOS UNIDOS: Department of Agriculture. 1961  
Predicting rainfall erosion losse. Table 11.

TABELA B.2 - FATOR C PARA ÁREA COBERTA COM FLORESTA

Porcentagem da área coberta por copa de árvores e vegetação rasteira	Porcentagem de área coberta por mate- rial grosseiro	Fator C
100 - 75	100 - 90	.0001 - .001
70 - 45	85 - 75	.002 - .004
40 - 20	70 - 40	.003 - .009

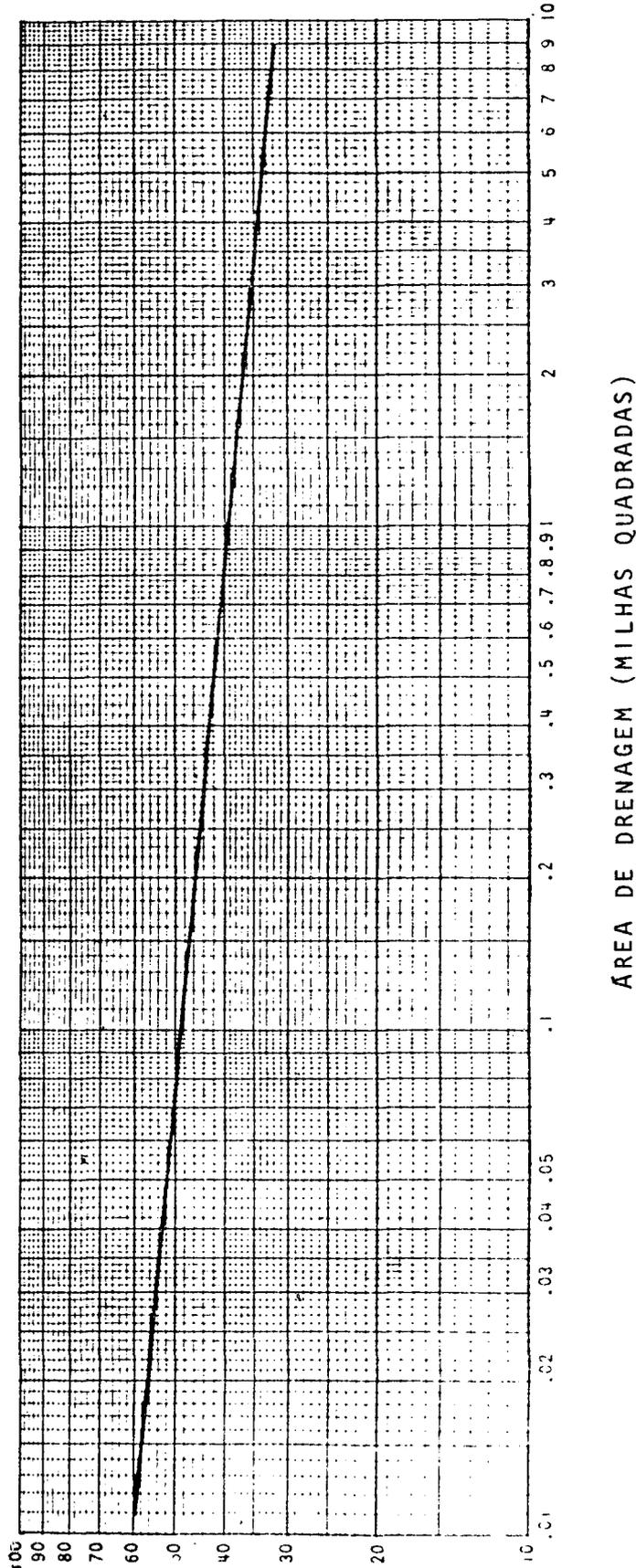
Ref.: ESTADOS UNIDOS: Department of Agriculture. 1961.  
Predicting rainfall erosion losses. Figura 3.

FIGURA B.1 - NOMOGRAMA DE CÁLCULO DO FATOR DE ERODIBILIDADE DO SOLO



Ref.: ESTADOS UNIDOS: Department of Agriculture. . 1961.  
Predicting rainfall erosion losse. Figure 4.

FIGURA B.2 - CURVA DO "SEDIMENT DELIVERY RATIO"  
 (ou curva da taxa de condução de sedimentos)



ÁREA DE DRENAGEM (MILHAS QUADRADAS)

Uso recomendado: onde a erosão ocorre em solos  
 de textura média e grosseira.