

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

PREVISÃO DE DEPLÚVIO (WASHLOAD)
EM RIOS DE ÁREAS ELEVADAS

TRABALHO APRESENTADO COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

M E S T R E E M H I D R O L O G I A
A P L I C A D A

Autor: PAULO KATSUAKI UMEZAWA

Orientador: FRANZ RAINER SEMMELMANN

Examinadores:

FRANZ RAINER SEMMELMANN

RUY LUZ DA SILVEIRA

ROBIN CLARKE

Data do exame: 11/04/79

Aprovado:

Presidente da Banca



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

ATA DE DISSERTAÇÃO

Às 08:30 horas do dia 11 de Abril de 1979, no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, reuniu-se a Comissão Examinadora de Dissertação do candidato ao grau de Mestre em Hidrologia Aplicada, Paulo Katsuaki Umezawa, para apreciação de seu trabalho intitulado "PREVISÃO DE DEPLÚVIO (WASH LOAD) EM RIOS DE ÁREAS ELEVADAS".

Abertos os trabalhos sob a presidência de Prof. Franz Semmelmann e presente o candidato, foi-lhe dada a palavra para uma exposição sobre as premissas, estrutura e resultados do trabalho apresentado. A seguir foi o mesmo arguido, sucessivamente, pelos examinadores, sobre diferentes aspectos provocados pelo exame do texto e pela exposição precedente. Encerrados os trabalhos desta fase, após as respostas do candidato, reuniu-se a Comissão Examinadora, sem a presença do candidato e das demais pessoas que compareceram à fase inicial, para atribuir seu julgamento, que é transcrito a seguir:

Examinador	Conceito
- Prof. Franz Semmelmann	A
- Prof. Ruy Luz da Silveira	A
- Prof. Robin Clarke	A

Resultou dos conceitos atribuídos o juízo final APROVADO
conceito final A, (Excelente).

Observações:

Ato contínuo, foi lavrada a presente ATA, que eu, Prof. Ruy Luz da Silveira, secretário da Comissão Examinadora, assino juntamente com a mesma Comissão.

Porto Alegre, 11 de Abril de 1979.

- *Franz Semmelmann*
- *Ruy Luz da Silveira*
-

PREVISÃO DE DEPLÚVIO (WASHLOAD)
EM RIOS DE ÁREAS ELEVADAS

PAULO KATSUAKI UMEZAWA (*)

Porto Alegre, abril de 1979

(*) Engenheiro Civil (UFPr)

A AKIRA UMEZAWA,
meu mestre, meu pai

E TSUNE UMEZAWA,
minha vida, minha mãe.

Ao Professor Franz Rainer Semmelmann, Dr., por sua atuação como Orientador deste trabalho.

Aos professores Rui Luz da Silveira, MSc., e Robin Clarke, Dr., pelos esclarecimentos e sugestões.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Hidrologia Aplicada - UFRGS, pelo embasamento que me proporcionaram.

Ao Centro de Hidrologia Aplicada do IPH-UFRGS pelo fornecimento dos dados básicos para a pesquisa.

Aos hidrotécnicos Geraldo Antonio Cassol, Marino Santos de Godoy, Bruno da Silva Rocha e José Pinto dos Santos pela participação nos trabalhos de campo e laboratório.

A Jussara Silva, pela elaboração das referências bibliográficas; e ao Pedro Francisco Donoso Garcia, pela confecção dos desenhos.

A Luzia Weiden Batista, pelo apoio e companhia.

Ao CNPq, pela bolsa de estudos concedida.

A FINEP, pelo financiamento dos trabalhos de campo.

Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS, pela oportunidade de realização deste curso.

Meus melhores agradecimentos

PREVISÃO DE DEPLÚVIO (WASHLOAD)

EM RIOS DE ÁREAS ELEVADAS *

Autor: Paulo Katsuaki Umezawa

Orientador: Prof. Franz Rainer Semmelmann

SINOPSE

Os rios de áreas elevadas, que drenam bacias hidrográficas, cujo solo é constituído, predominantemente, de silte e argila, apresentam, frequentemente, o deplúvio como sedimentos transportados em suspensão. Neste caso, as fórmulas estabelecidas para o cálculo do transporte de sedimentos tornam-se inadequadas para a estimativa da quantidade de sedimentos que passa por uma secção transversal do rio.

Por outro lado, verifica-se que o estudo sobre sedimentos fluviais está, ainda, em fase incipiente no Brasil. Os métodos de estimativa de sedimentos fluviais, conhecidos na literatura, são, muitas vezes, inaplicáveis em nosso país, devido à escassez ou mesmo à inexistência de registros sedimentométricos.

Em vista disso, pesquisou-se, neste trabalho, um procedimento de estimativa de deplúvio (Washload) que, pela sua natureza simples, é de fácil aplicação. O método é denominado Sedimentograma Unitário, e se baseia nos princípios do método do Hidrograma Unitário aplicado no escoamento superficial, e pelo qual é possível estimar a produção de deplúvio de uma bacia hidrográfica, e sua variação no tempo, com base a precipitação efetiva.

Objetivando a determinação da forma precisa de sedimentogramas de deplúvio, em períodos de cheia, construíram-se dois equipamentos automáticos de coleta de amostras de mistura

água-sedimento. Esses equipamentos funcionam conforme as variações de nível da água e coletam amostras na elevação e na descida do rio. São denominados, respectivamente, ANA-78 (Amostrador de Nível Ascendente) e AND-78 (amostrador de Nível Descendente).

O método do Sedimentograma Unitário e os equipamentos de coleta de amostras foram testados na bacia hidrográfica do Rio Forquetinha, situada no município de Lageado, no Estado do Rio Grande do Sul, durante o período compreendido entre 17 de julho e 17 de novembro de 1.978.

A estimativa resultante da aplicação do método pesquisa e os valores de concentração de sedimentos em suspensão, obtidos pelos equipamentos automáticos, mostram a adequação desses procedimentos na estimativa de sedimentos fluviais, em rios de áreas elevadas.

* Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Hidrologia Aplicada (Área de concentração - Sedimentologia), Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, abril de 1979.

ESTIMATION OF WASHLOAD IN UPLAND RIVERS *

Author: Paulo Katsuaki Umezawa
Adviser: Prof. Franz Rainer Semmelmann

SUMMARY

Upland rivers draining river basins of silt and clay soils, frequently carry suspended sediment loads under the form of washload. In that case established formulae to calculate sediment discharge are not adequate to predict the amount of sediment that will pass a cross-section of a river.

On the other hand as the study of river sediments in Brazil is as yet incipient, methods to estimate river sediments, known in literature are often not applicable in our country due to the scarcity or complete lack of sediment measurement data.

In this study, therefore an attempt has been made to investigate a simple method of washload estimation. The method is called Unit Sedimentgraph, and is based on the principle of the Unit Hydrograph applied to surface flow, through which it is possible to estimate the production of washload in a river basin, and its variation in time based on effective rainfall.

Two automatic devices to collect samples of water and sediment mixtures were built so as to determine the exact shape of washload sedimentgraphs during high flow periods. These single stage samplers function according to water stage variations and gather samples as the water level rises and falls. They are called ANA-78 (sampler of rising levels) and AND-78 (sampler of falling levels).

The Unit Sedimentgraph method and sampling equipment were tested in the Forquetinha River Basin, (county of

Lageado), State of Rio Grande do Sul, from July 17 to November 17, 1978.

The estimates which resulted from the application of the method which was investigated, and the rates of concentration of suspended sediment obtained by means of the use of automatic equipment show these methods to be adequate for the estimation of river sediments in up-land areas.

* Thesis for the Master Degree in Applied Hydrology (Speciality - Sedimentology), Institute of Hydraulic Research of the Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, April, 1979.

SUMÁRIO

	Página
1. Introdução.	1
2. Considerações preliminares.	6
2.1. Aspectos gerais de sedimentos fluviais	6
2.2. Os processos de erosão pluvial	8
2.2.1. Erosão laminar.	12
2.2.2. Erosão por ravinamento.	13
2.2.3. Formação de vossorocas.	15
2.3. Formas de transporte de sedimentos fluviais	17
2.4. O deplúvio	19
2.5. Estimativa de produção de sedimentos.	20
2.6. O método do Sedimentograma Unitário	23
2.7. Obtenção de dados sedimentométricos	25
2.7.1. Técnicas comumente usadas na coleta de amostras da suspensão em rios	27
2.7.2. Equipamentos empregados na coleta de amostras da suspensão	29
2.7.3. Procedimentos de laboratório para a determinação da concentração e análise granulométrica	33
3. Estimativa de deplúvio em rios de áreas elevadas.	38
3.1. Área de estudo: Bacia do Rio Forquetinha	39
3.1.1. Descrição geral da Bacia do Rio Forquetinha	41
3.1.1.1. Situação	41
3.1.1.2. Características físicas.	42
3.1.1.3. Clima.	43
3.1.1.4. Solo	44
3.1.1.5. Características litológicas.	44
3.1.1.6. Cobertura vegetal.	44
3.2. Procedimento quantitativo para estimativa de deplúvio, aplicado a Bacia do Rio Forquetinha	45
3.2.1. Análise granulométrica dos sedimentos constituintes do sistema fluvial.	47
3.2.1.1. Materiais das vertentes.	47
3.2.1.2. Materiais do leito do rio.	48
3.2.1.3. Sedimentos em suspensão.	49
3.2.2. Método do Sedimentograma Unitário para estimativa do deplúvio.	53
3.2.3. Obtenção dos dados.	55
3.2.3.1. Precipitação	55
3.2.3.2. Vazão.	58
3.2.3.3. Concentração de sedimentos em suspensão	60

	Página
3.2.3.3.1. Procedimentos de campo.	63
3.2.3.3.2. Procedimentos de laboratório	67
3.2.4. Seleção dos eventos para a análise do Sedimentograma Unitário	76
3.2.5. Obtenção do Sedimentograma Unitário	78
3.2.5.1. Sedimentograma Unitário a partir de Chuvas Isoladas	79
3.2.5.2. Sedimentograma Unitário a partir de Chuvas Complexas	89
3.2.6. Verificação dos Sedimentogramas Unitários obtidos	123
3.2.7. Escolha do Sedimentograma Unitário final .	133
3.2.8. Relação entre Sedimento Efetivo Mobilizado e Precipitação Efetiva (SE versus QE) . . .	135
3.2.9. Amostragem automática	143
3.2.9.1. Amostrador de Nível Ascendente (ANA-78)	146
3.2.9.2. Amostrador de Nível Descendente (AND-78)	155
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	161
4.1. Análise granulométrica	163
4.2. Dados obtidos para a aplicação do método do Sedimentograma Unitário	166
4.2.1. Precipitação	167
4.2.2. Vazão	168
4.2.3. Concentração de sedimentos em suspensão . .	169
4.3. Obtenção do Sedimentograma Unitário	172
4.4. Verificação dos Sedimentogramas Unitários obtidos	175
4.5. Escolha do Sedimentograma Unitário final	176
4.6. Relação SE versus QE	177
4.7. Exemplo de aplicação do Sedimentograma Unitário .	179
4.8. Amostradores automáticos	187
5. CONCLUSÕES	194
6. BIBLIOGRAFIA CITADA	197
7. ANEXOS	202
7.1. Anexo I - Características físicas da Bacia do Rio Forquetinha	202
7.2. Anexo II - Correlação entre valores de concentração de sedimentos em suspensão, obtidos pelo amostrador utilizado pelo observador e o US-D 49 . . .	213

LISTA DE TABELAS

	Página
01. Coeficiente (c) para correção da concentração. . .	34
02. Determinação da precipitação média (mm) dos eventos selecionados	59
03. Relação nível-descarga do Posto-4	61
04. Dados básicos.	70
05. Determinação do ponto "C" dos hidrogramas.	85
06. Cálculo do HU (10,6) e SU (1,6) - chuva isolada - 21-22-23/julho/78.	90
07. Cálculo do HU (10,6) e SU (1,6) - chuva isolada - 23-24-25/julho/78.	91
08. Cálculo do QD e SD - chuvas complexas - 14-15-16/agosto/78	104
09. Cálculo do QD e SD - chuvas complexas - 29-30-31/agosto/78	105
10. Cálculo do QD e SD - chuvas complexas - 07-08-09/setembro/78	106
11. Cálculo do QD e SD - chuvas complexas - 13-14-15-16/setembro/78	107
12. Cálculo dos coeficientes	108
13. Cálculo do SU (1,6) - chuvas complexas -14-15-16/agosto/78.	110
14. Cálculo do SU (1,6) - chuvas complexas -29-30-31/agosto/78.	111
15. Cálculo do SU (1,6) - chuvas complexas -07-08-09/setembro/78.	112
16. Cálculo do SU (1,6) - chuvas complexas -13-14-15-16/setembro/78	113

	Página
17. Cálculo do HU (10,6) - chuvas complexas - 14-15 -16/agosto/78	115
18. Cálculo do HU (10,6) - chuvas complexas - 29-30 -31/agosto/78	116
19. Cálculo do HU (10,6) - chuvas complexas - 07-08 -09/setembro/78	117
20. Cálculo do HU (10,6) - chuvas complexas - 13-14 -15-16/setembro/78	118
21. Verificação dos SU e HU obtidos	132
22. Determinação do pico médio do SU e HU	135
23. Determinações da reta de regressão de log SE para log QE e dos intervalos de confiança da estimati va.	139
24. Cálculo do SD e QD - chuva isolada - 03-04-05/no vembro/78	181
25. Aplicação do SU (1,6) ao evento 03-04-05/novembro /78	185
26. Determinação das curvas Hipsométricas e Freqüên cia Altimétrica	204
27. Cálculo do índice de suscetibilidade, de Roché. .	209
28. Determinação da reta de regressão - correlação entre amostradores.	215

LISTA DE FIGURAS

	Página
01. Localização da Bacia do Rio Forquetinha.	40
02. Distribuição granulométrica dos materiais das ver- tentes	50
03. Distribuição granulométrica dos materiais do lei- to	51
04. Distribuição granulométrica dos sedimentos em sus- pensão	52
05. Postos pluviométricos.	57
06. Curva-chave do Posto-4	62
07. Secção transversal do Posto-4.	65
08. Variação da concentração de sedimentos em suspen- ção na secção transversal do Posto-4	68
09. Distribuição temporal da precipitação, vazão e con- centração de sedimentos em suspensão	75
10. Hidrograma e sedimentograma - chuva isolada - 21- 22-23/julho/1978	81
11. Hidrograma e sedimentograma - chuva isolada - 23- 24-25/julho/1978	82
12. SU (1,6) - chuva isolada - 21-22-23/julho/78 . . .	92
13. SU (1,6) - chuva isolada - 23-24-25/julho/78 . . .	93
14. HU (10,6) - chuva isolada - 21-22-23/julho/78. . .	94
15. HU (10,6) - chuva isolada - 23-24-25/julho/78. . .	95
16. Hidrograma e sedimentograma - chuvas complexas - 14-15-16/agosto/1978	99
17. Hidrograma e sedimentograma - chuvas complexas - 29-30-31/agosto/1978	100

	Página
18. Hidrograma e sedimentograma - chuvas complexas - 07-08-09/setembro/1978	101
19. Hidrograma e sedimentograma - chuvas complexas - 13-14-15-16/setembro/1978.	102
20. SU (1,6) - chuvas complexas - 14-15-16/agosto/78 .	124
21. SU (1,6) - chuvas complexas - 29-30-31/agosto/78 .	125
22. SU (1,6) - chuvas complexas - 07-08-09/setembro/ 78	126
23. SU (1,6) - chuvas complexas - 13-14-15/setembro/ 78	127
24. HU (10,6)- chuvas complexas - 14-15-16/agosto/78 .	128
25. HU (10,6)- chuvas complexas - 29-30-31/agosto/78 .	129
26. HU (10,6)- chuvas complexas - 07-08-09/setembro/ 78	130
27. HU (10,6)- chuvas complexas - 13-14-15/setembro/ 78	131
28. Obtenção do SU (1,6)	132
29. Obtenção do HU (10,6).	136
30. Reta de regressão - relação QE x SE.	142
31. Limite de confiança da estimativa dos logaritmos de SE a partir dos logaritmos de QE.	144
32. Tomada de amostra - ANA-78	148
33. Saída de ar - ANA-78	149
34. Sedimentograma do ANA-78; 20-21-22/julho/1978. . .	152
35. Sedimentograma do ANA-78; 14-15-16/agosto/1978 . .	153
36. Sedimentograma do ANA-78 e AND-78; 3-4-5/novembro /1978.	154

	Página
37. Desenho esquemático do AND-78.	156
38. Fotos.	160
39. Hidrograma e sedimentograma - chuva isolada - 03- 04-05/novembro/78	182
40. Relação QE x SE e SU (1,6) para Bacia do Rio Forquetinha, entre 17 de julho a 17 de novembro de 1978	184
41. Aplicação do SU (1,6) - 03-04-05/novembro/78 . . .	186
42. Curvas Hipsométrica e Frequência Altimétrica da Bacia do Rio Forquetinha	205
43. Retângulo Equivalente.	208
44. Perfil longitudinal e Declividades do Rio Forquetinha.	210
45. Reta de regressão - correlação entre amostradores.	216

1 - INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico acelerado e o crescimento populacional, verificados neste século, ocasionaram o desnudamento de extensas áreas e a intensa utilização dos recursos naturais. As alterações provocadas no meio natural ocorreram de modo simplesmente exploratório, sem qualquer preocupação com o equilíbrio ambiental. A consequência dessa agressão à natureza foi uma sensível alteração no sistema ecológico, com reflexos altamente negativos, como é o caso das catástrofes climatológicas ocorridas nos últimos anos em várias partes do mundo.

Os recursos hídricos sofreram graves prejuízos, caracterizados pela diminuição da qualidade de suas águas, provocada por diferentes tipos de agentes poluentes. Problemas fluviais tornaram-se freqüentes, como, por exemplo, o das inundações de áreas ribeirinhas, causadas por ondas de cheia. Normalmente os danos causados por esse tipo de evento são agravados pelos sedimentos fluviais trazidos pelas águas.

Os problemas causados por sedimentos fluviais, têm-se verificado desde há muito tempo, sob diferentes formas. Atualmente, devido a crescente valorização das terras e dos recursos hídricos, as atenções foram voltadas no sentido de desenvolverem-se técnicas de solução, e/ou prevenção dos problemas

causados por sedimentos fluviais. Pesquisas no campo da Se
dimentologia têm sido incrementadas pelos progressos cientí
ficos e tecnológicos.

Em países considerados desenvolvidos, as pesquisas sobre
sedimentos fluviais tiveram seu início no começo deste sécu
lo, quando vários métodos e técnicas foram desenvolvidos pa
ra a compreensão do fenômeno (FLEMING 1975; SIMONS & SEN
TÜR^üK, 1977) e seu combate. Atualmente, aqueles países pos
suem informações sobre sedimentos fluviais que possibilitam
a aplicação de vários métodos e o desenvolvimento de técnicas
cada vez mais sofisticadas.

Entretanto, no Brasil, as pesquisas sobre sedimentos flu
viais está, ainda, em fase incipiente. Os poucos trabalhos rea
lizados sobre sedimentos fluviais, abordam o problema de for
ma muito específica, ou seja, visam à solução local e imedia
to do problema (COMISSÃO..., 1958; CARVALHO, 1966; SEMMELMANN,
1973). Somente nos últimos anos foram feitos estudos no sen
tido de pesquisar o problema de sedimentos fluviais em esca
la mais ampla, analisando-se os fenômenos envolvidos nos pro
cessos causadores do problema (BRASIL, 1972; SEMMELMANN, 1978;
INSTITUTO..., 1979).

O estudo sobre sedimentos fluviais abrange a compreensão
dos processos de erosão, transporte e deposição de materiais
do solo. Um dos obstáculos freqüentemente encontrados pelos
pesquisadores é a escassez, ou, muitas vezes, a inexistência

de registros históricos de dados hidro-meteorológicos e principalmente sedimentométricos para o desenvolvimento dos estudos.

Dentro do quadro acima apresentado, desenvolveu-se este trabalho, visando a dar uma contribuição aos estudos de sedimentos fluviais em nosso país, atualmente ainda incipiente, como já foi dito, mas que deverá ser incrementado, pela conscientização de órgãos competentes e de pesquisadores, da necessidade de elucidar o problema e possibilitar soluções mais adequadas.

O presente trabalho mostra um procedimento de estimativa do transporte de sedimentos em suspensão, aplicável em rios que apresentam características particulares, onde fórmulas de transporte de sedimentos tais como a de Meyer-Peter - Muller, Bagnold, Lane e Kalinske, não são passíveis de aplicação ou são inadequadas.

As fórmulas de transporte de sedimentos são geralmente aplicadas a rios aluviais, onde os sedimentos transportados são provenientes do leito, e o seu movimento é governado pela capacidade de transporte do escoamento fluvial.

Por outro lado, em rios de áreas elevadas, ou em trechos de cabeceira da maioria dos rios, os sedimentos são transportados, predominantemente, em suspensão. São originários da superfície da bacia contribuinte e introduzidos na calha fluvial, por influxo lateral de águas de escoamento superficial.

Esses sedimentos, denominados deplúvio (washload), apresentam granulometrias bem menores que os constituintes do leito do rio, e o seu movimento não é governado pela capacidade de transporte do escoamento fluvial, mas sim pela sua disponibilidade, ao transporte, na superfície da bacia contribuinte.

Poucos são os procedimentos conhecidos para estimar a quantidade de sedimentos provenientes da superfície da bacia. Entre esses, o método mais compreensível é a Equação Universal da Perda de Solo (WISCHMEIER & SMITH, 1961), cuja aplicação na área deste estudo não foi possível, devido a falta de dados específicos.

O objetivo deste trabalho é apresentar um procedimento de estimativa de sedimentos em suspensão em rios, que apresentam como tal o deplúvio, baseado nos princípios do Hidrograma Unitário de Sherman (SHERMAN, 1942). O método é denominado Sedimentograma Unitário e adota como unidade padrão 1 tonelada para uma dada duração de precipitação distribuída uniformemente, sobre a área da bacia.

Desenvolveram-se também neste trabalho, dois equipamentos de coleta de amostras de mistura água-sedimento (ANA -78 e AND - 78), objetivando a obtenção de dados sedimentométricos mais precisos em períodos de cheia. Com isso pretendeu-se dar uma contribuição no campo da Sedimentometria, no sentido de incrementar nossos conhecimentos sobre a incidência de maiores taxas de transporte de sedimentos fluviais, em suspen

são, durante a passagem de uma enchente.

O trabalho está composto em sete partes.

A primeira constitui esta introdução.

Na segunda parte, se faz a descrição teórica dos processos de erosão, transporte e deposição; apresentam-se as técnicas de estimativa da produção de sedimentos; e a seguir descrevem-se os procedimentos de campo e laboratório para a obtenção de dados sedimentométricos.

Na terceira parte, se faz a descrição da Bacia do Rio Forquetinha, considerada como área de estudo, apresentando-se também o desenvolvimento quantitativo do método do Sedimentograma Unitário, para a estimativa de deplúvio.

A quarta parte é constituída pela apresentação e discussão dos resultados parciais e finais e dos procedimentos empregados durante o trabalho; nessa parte, estão, ainda, as sugestões que os resultados obtidos sugerem.

Na quinta parte, estão as conclusões finais, a que se chegou no final do estudo.

A sexta parte contém a bibliografia consultada durante o trabalho.

A última parte é formada pelos anexos.

2. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

O desenvolvimento de uma técnica adequada para a estimativa quantitativa do escoamento de sedimentos fluviais envolve o conhecimento dos processos de erosão, transporte e deposição, assim como dos procedimentos de campo e laboratório para a obtenção de dados. Portanto, antes de tratar do procedimento quantitativo deste, se fará uma apresentação teórica desses tópicos.

2.1. Aspectos gerais de sedimentos fluviais

A erosão, transporte e deposição de sedimentos são processos naturais que têm ocorrido através dos tempos geológicos, moldando a atual paisagem da terra. Os principais agentes que atuam nesses processos são a água, o vento, a gravidade e o gelo.

Neste trabalho, somente a água será considerada como agente interveniente nos processos, embora o vento e o gelo possam ter significativa importância em determinadas regiões. A gravidade é um agente que atua em todos aqueles processos, juntamente com outros agentes. Dessa forma, denominar-se-ão erosão hídrica, ao processo de destacamento e remoção de partículas de rocha pela ação da água, e sedimento fluvial ao

material transportado pela, ou suspenso na, ou depositado pela água.

Os processos de erosão transporte e deposição de sedimentos fluviais são complexos. Erosão é um processo de "trabalho", para o qual, a energia é fornecida pelo impacto das gotas de chuva, caindo sobre a superfície do solo e pelo fluxo de água que escorre superficialmente sob ação da gravidade (MEYER, 1971).

GLYMPH (1975) define erosão em acepção moderna, como sendo "um sistema, que é um processo difuso, distribuído no tempo e no espaço que pode ser acelerado ou desacelerado por multiplicidade de fatores, inclusive atividade humana. Imposições naturais ou induzidas limitam a extensão do sistema. E o efluente do processamento do sistema sobre o solo é uma mistura mineral e orgânica, de granulometria e propriedades químicas variáveis".

Os prejuízos causados pelos sedimentos fluviais são grandes e variados e dependem da quantidade e características dos sedimentos, que por sua vez são influenciadas pelos processos de erosão, transporte e deposição.

Conforme MEYER (1971) e WISCHMEIER (1973), os sedimentos causam, freqüentemente, três tipos de prejuízos: no local de origem, no trecho onde transitam e onde os sedimentos se depositam.

No local onde o sedimento se origina, o prejuízo é veri

ficado com maior intensidade na agricultura, pela redução da fertilidade e produtividade dos solos. Em estágio mais avançado, a erosão pode alterar a conformação do terreno, inutilizando-o para a prática agrícola ou mesma para o desenvolvimento urbano.

O sedimento em transporte afeta a qualidade das águas e sua adequacidade ao consumo humano ou ao uso industrial.

Os problemas criados pela deposição de sedimentos são os mais variados. Materiais podem ser depositados nos pés das vertentes e em várzeas, soterrando culturas, reduzindo a fertilidade do solo e causando danos em áreas urbanas. Sedimentos depositados em canais fluviais reduzem a capacidade de escoamento do rio, resultando isso em freqüentes inundações e ocasionando danos em propriedades adjacentes. Depósito de sedimentos em canais de drenagem e irrigação, em canais de navegação, em reservatórios e em portos, não só causam transtornos, como também exigem enormes gastos na manutenção dessas estruturas hidráulicas (TASK COMMITTEE, 1965).

2.2. Os processos de erosão pluvial

A água é o mais eficaz agente de erosão e responsável pelo transporte de sedimentos do local de origem até o local da eventual deposição.

A erosão do solo por águas pluviais é um complexo pro

cesso de destacamento de partículas de solo da superfície do terreno, por ação do impacto das gotas de chuva, e de seu transporte através do escoamento superficial.

MEYER et alii (1975) designam como agentes erosivos o impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo e o fluxo de água do escoamento superficial, os quais destacam as partículas da massa do solo e as transportam, por ação da gravidade, até um eventual depósito.

SHEN & LI (1976) atribuem à causa da erosão a um processo ou a uma combinação de processos:

- a) destacamento de partículas de solo por ação do impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo;
- b) transporte do material destacado e erosão laminar no escoamento superficial incipiente;
- c) erosão em pequenos canais com fluxo concentrado, em vossorocas e na calha fluvial;
- d) deslizamento maciço da terra.

Com a finalidade de melhor conhecer o processo da erosão, para o desenvolvimento de modelos matemáticos de simulação, vários autores (MEYER & WISCHMEIER, 1969; FOSTER et alii, 1968; FOSTER & MEYER, 1975) subdividiram o processo em sub-processos de erosão:

- a) destacamento de partículas de solo por impacto das gotas de chuva;
- b) transporte das partículas destacadas, por ação do im

pacto;

- c) destacamento por escoamento superficial;
- d) transporte por escoamento superficial.

O processo erosivo do solo inicia, quando gotas de água (precipitação) atingem a superfície do solo. O caráter explosivo do impacto das gotas, destaca partículas de massa do solo, que são atiradas em todas as direções do local de impacto (MUTCHLER & YOUNG, 1975).

Com a continuação da precipitação, após ser suprida a capacidade de infiltração do solo, e o seu armazenamento em micro-relevos da superfície (armazenamento superficial), tem início o escoamento por fluxo laminar (MEYER, 1971).

O fluxo laminar (overland-flow) é formado por uma pelíícula de água de pequena espessura que ao fluir, causa erosão, destacando e transportando partículas de solo, juntamente com aquelas fornecidas pela erosão por impacto (MEYER et alii, 1975).

O escoamento por fluxo laminar, após breve percurso, concentra-se em canalículas, formadas por micro-topografia natural, atividade humana ou erosão prévia. O aumento do fluxo, pela concentração dos escoamentos, causa a erosão por ravinamento (FOSTER & MEYER, 1975).

Na continuidade do fluxo d'água em direção a um rio, o escoamento pode provocar outro tipo de erosão caracterizada pela formação de vossorocas, dependendo do tipo de solo, de

clividade e outros fatores controladores da erosão (HEEDE, 1975).

O efeito do processo erosivo varia de área para área, conforme a resistência apresentada pela superfície do solo.

Conforme MEYER (1971), a resistência de um solo às forças erosivas da precipitação e ao fluxo do escoamento superficial depende das propriedades do solo: tamanho, forma e coesividade das partículas, densidade e poder de agregação da macroestrutura.

As análises das características dos solos da superfície da bacia hidrográfica e dos sedimentos transportados pelo rio, podem informar quanto à origem dos sedimentos produzidos pela ação do processo erosivo.

A identificação da origem dos sedimentos é importante no desenvolvimento de técnicas para redução da perda de solo, assim como para a aplicação de métodos de previsão de produção de sedimentos em bacias hidrográficas.

Na erosão superficial do solo por água, são, frequentemente, estudados os seguintes processos erosivos (ANDERSON, 1975);

- a) erosão laminar;
- b) erosão por ravinamento;
- c) formação de vossorocas.

PIEST et alii (1975), em estudo realizado na bacia do Rio Mississippi, determinou que cerca de 80% dos sedimentos

são produzidos na superfície da bacia, em forma de erosão laminar e ravinamento, e 20% em forma de vossoroca. Ocorrências semelhantes foram verificadas no estudo realizado na região noroeste do Estado do Paraná, onde áreas rurais são afetadas por erosão laminar e erosão por ravinamento (BRASIL, 1972).

2.2.1. Erosão laminar (Sheet erosion)

Vários autores (MEYER et alii, 1975; FOSTER & MEYER, 1975; MUTCHLER & YOUNG, 1975) denominam de erosão laminar ao efeito combinado da erosão por impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo e da erosão por fluxo não concentrado do escoamento superficial.

A dissipação da energia de impacto das gotas de água sobre a superfície do solo desprotegido, entre outros fatores, desagrega e transporta partículas de solo, em intensidade que varia em função da espessura da lâmina de água e diâmetro da gota. MUTCHLER & YOUNG (1975), concluíram que o impacto das gotas de água tem maior poder erosivo, quando a superfície do solo é coberto por uma lâmina de água de espessura entre 0,14 e 0,20 do diâmetro da gota e é insignificante, quando a espessura ultrapassa cerca de três vezes o diâmetro da gota.

A taxa de destacamento de partículas por impacto é uma função do tempo, mesmo para uma chuva de intensidade constan

te. Normalmente, essa taxa aumenta rapidamente no início da chuva atinge o pico e diminui exponencialmente (FOSTER & MEYER, 1975).

As partículas de solo são destacadas e transportadas às canálicas de escoamento concentrado, por ação do impacto. Entretanto, o principal meio de transporte dessas partículas é a fina camada de água que flui no sentido a jusante, acelerado por ação do impacto e gravidade (MEYER et alii, 1975; MUTCHLER & YOUNG, 1975).

Os fatores que influem no processo da erosão laminar são aqueles que governam a erosão por impacto e transporte por escoamento não concentrado, os quais, conforme FOSTER & MEYER (1975) são os seguintes:

- a) energia da precipitação;
- b) características do solo;
- c) declividade da vertente;
- d) rugosidade da superfície;
- e) capacidade de transporte das partículas destacadas.

2.2.2. Erosão por ravinamento (Rill erosion)

O processo de erosão do solo por ravinamento é subse-quente à erosão laminar, quando a capacidade erosiva do es-coamento concentrado, em algum ponto, excede à disponibilida-de de partículas para resistir ao destacamento.

Os dois subprocessos mais importantes da erosão por ra-

vinamento são o destacamento de partículas de solo e o transporte dessas partículas por ação do escoamento. O desenvolvimento de ravinas, por si só, é um resultado desse destacamento. O escoamento concentrado transporta as partículas de solo por ele destacadas mais aquelas provenientes da erosão laminar.

O desenvolvimento de ravinas processa-se nas vertentes, em forma de talhe (head-cut), onde ocorre intensa erosão localizada, produzindo a maior parte dos sedimentos provenientes deste tipo de erosão. Entretanto, ravinas podem também ocorrer sem talhe, com o acréscimo uniforme da taxa de erosão com a distância ao longo da linha de escoamento concentrado (MEYER et alii, 1975).

O material disponível ao transporte pelo fluxo concentrado em ravinas é constituído inicialmente de agregados, que transitam como "material de arraste". Isto levou alguns autores (FOSTER & MEYER, 1975) a concluírem que é possível aplicar fórmulas de transporte de sedimentos, tais como as de Yalin e DuBoys, naqueles trechos.

Em vertentes de solos coesivos, a capacidade de transporte por fluxo concentrado é, geralmente, maior que a taxa de destacamento de partículas de solo. Portanto, a taxa de destacamento normalmente limitará a taxa de erosão em solos coesivos.

Em vertentes de solos não-coesivos, ou em locais onde a

capacidade de transporte do escoamento diminui consideravelmente, a carga de sedimentos pode aproximar-se da capacidade de transporte e a taxa de destacamento decrescerá.

Assim, se a carga de sedimentos exceder à capacidade de transporte, resultará em deposição. O decréscimo da capacidade de transporte ocorre, quando a declividade do canal diminui, ou ele se alarga, ou forma um poço, ou quando o escoamento é retardado por vegetação ou detritos (MEYER et alii, 1975).

A extensão e o tipo de erosão por ravinamento que se desenvolve em vertentes são funções das propriedades do solo, da declividade da vertente e de outras características topográficas, e da taxa de escoamento e prática de cultivo (FOSTER & MEYER, 1975).

2.2.3. Formação de vossorocas (Gully erosion)

As vossorocas são resultantes da ação do fluxo de água, concentrado em terrenos desprotegidos, ocasionando o aprofundamento e alargamento do canal de escoamento. É um processo erosivo subsequente ao ravinamento, que pode ocorrer em certas áreas.

A origem das vossorocas está na concentração do escoamento superficial em uma linha de drenagem permanente ou temporária, e têm como agentes erosivos as águas superficiais.

e águas subterrâneas, estas últimas atuando a partir de uma certa profundidade da ravina (PONTES, 1975).

A erosão do leito de uma vossoroca depende de força de arraste do fluxo de água e da carga de sedimentos por ele transportados. Se a força de arraste é superior àquela necessária para o transporte da carga sólida, ocorrerá a erosão, e o leito continuará a se aprofundar. Caso contrário, haverá depósito e o leito se elevará, ou haverá equilíbrio, e o leito ficará estável.

De acordo com PONTES (1975), os fatores que governam o processo erosivo das vossorocas são:

- a) fluxo de água (vazão);
- b) declividade do perfil longitudinal da linha d'água;
- c) natureza do terreno.

Vários autores (HEEDE, 1975; PIEST et alii, 1975) classificam as vossorocas em contínuas e descontínuas. As vossorocas contínuas têm suas origens nas partes altas do terreno, em pequenas ravinas, que seguem seus cursos para jusante até a base principal do valo. Enquanto que as vossorocas descontínuas se originam em qualquer ponto da vertente que apresente uma queda abrupta e se desenvolvem no sentido para montante.

As vossorocas são caracterizadas por canais com taludes bem acentuados e vários metros de altura, como ocorre na região noroeste do Estado do Paraná, onde atingem profundidades

de até 40 m (PONTES, 1975; BRASIL, 1972).

O total de sedimentos produzidos em vossorocas é geralmente menor que o produzidos por erosão laminar e ravinamento, no entanto, os prejuízos econômicos causados pela formação de vossorocas, em áreas urbanas, são significativas (TASK COMMITTEE, 1970; BRASIL, 1972)

2.3. Formas de Transporte de Sedimentos Fluviais

A questão que comumente surge em estudos de sedimentos fluviais refere-se à determinação da quantidade de sedimentos que passa por uma secção transversal do curso d'água que drena uma determinada bacia hidrográfica.

Sabe-se que nem todo o sedimento que passa por uma secção transversal de um rio se move de acordo com a mesma lei. Este é o mais difícil aspecto do transporte de sedimentos, e pode causar certa confusão. Por isso, antes de entrar na descrição do procedimento quantitativo de medição, é necessária uma análise qualitativa das leis que governam o transporte de sedimentos.

Os sedimentos fluviais são transportados por uma forma ou pela combinação de três formas geralmente aceitas, dependendo do diâmetro das partículas e da capacidade de transporte do escoamento.

SHEN (1971) classifica o transporte de sedimentos nos

seguintes tipos:

a) rolamento ou deslizamento sobre a superfície do leito, como "arraste";

b) elevação para dentro do escoamento com subseqüentes apoios sobre o leito, com "saltação";

c) suspensão e suporte pelo fluido envolvente durante todo o movimento, como "suspensão".

Sedimentos que se movem como arraste ou saltação são chamados "material do leito", enquanto os sedimentos que são suportados pelo escoamento e se movem como suspensão são chamados "material em suspensão".

O movimento do "material do leito" é governado pela capacidade de transporte do escoamento, que, por sua vez, é dependente da natureza do canal e do próprio sedimento. Esse movimento pode ser predito em função do escoamento (EINSTEIN, 1950).

Em muitos rios, grande parte dos sedimentos é transportada em suspensão, na condição de seu suprimento ilimitado, como "sedimentos em suspensão". Estes são mantidos em suspensão no interior do escoamento pela ação de forças de sustentação da turbulência, e se movem à mesma velocidade do rio, aproximadamente. (NORDIN & McQUIVEY, 1971).

Quando a disponibilidade de sedimentos para o transporte, no leito, é menor que a capacidade de transporte do escoamento, a quantidade de sedimentos transportados pelo rio é ditada pela taxa de seu fornecimento a montante.

Nesse caso, as fórmulas estabelecidas de transporte de sedimentos tornam-se inadequadas à aplicação. EINSTEIN (1964) observa a possibilidade de correlação da quantidade de sedimentos em transporte com a produção de sedimentos na superfície da bacia contribuinte, em tais casos.

SHEN (1971) denomina de deplúvio (washload) aquela parte dos sedimentos transportados pelos rios, que é governada pelo fornecimento a montante, e que apresenta granulometria menor que os materiais componentes do leito.

Portanto, em um rio que apresenta uma capacidade de transporte do escoamento maior que a disponibilidade de sedimento ao transporte e material de fundo com granulometria maior que o material em suspensão, este é caracterizado como sendo deplúvio.

2.4. O deplúvio

Muitos dos sedimentos levados aos rios e reservatórios são originários de áreas elevadas, tais como áreas de cultivo e locais de construção. Esses sedimentos têm sua origem na superfície da bacia, de onde, pelos processos de erosão laminar e erosão por ravinamento, são levados aos cursos d'água, sendo por isso denominados deplúvio (washload).

O deplúvio é constituído, normalmente, de sedimentos finos, que são facilmente introduzidos no escoamento. É relati

vamente insensível a parâmetros do escoamento fluvial, sendo função somente da sua disponibilidade ao transporte, na bacia contribuinte (TASK COMMITTEE, 1970; EINSTEIN, 1964).

GRAF (1971) relata que a quantidade de deplúvio em um rio pode ser relacionada à disponibilidade ao transporte de partículas sólidas na bacia, e que o deplúvio é proveniente da erosão da superfície da bacia e não da erosão na calhã fluvial. Ele meramente escoa através da secção transversal, podendo assim esperar-se uma certa relação com o vazão.

Conforme NORDIN & RICHARDSON (1971), o deplúvio é uniformemente distribuído com relação a vertical e lateral na secção transversal do rio.

A importância da consideração do deplúvio na análise do transporte de sedimentos está no fato de que vários autores (SHEN, 1971; GRAF, 1971; EINSTEIN, 1964) têm indicado que em muitas situações, ele compreende 90% a 95% do total de sedimentos transportados pelos rios.

TASK COMMITTEE (1970) aconselha que o deplúvio seja separado do material do leito, na análise da descarga de sedimentos em períodos de cheia.

2.5. Estimativa de produção de sedimentos

O desenvolvimento de técnicas adequadas para o combate ao problema de sedimentos fluviais exige o conhecimento qua

litativo e quantitativo dos fenômenos envolvidos nos proces
os causadores do problema.

A partir desse conhecimento, é possível definir-se um procedimento para solução ou prevenção do problema de sedimen
tos fluviais, cuja magnitude depende da intensidade com que o evento ocorre.

O método de determinação quantitativa do sedimento que passa por uma secção transversal de um rio depende da natureza
do sedimento e do canal, ou seja, do tipo de transporte verificado.

Atualmente, com o recurso de meios rápidos de cálculo, muitos métodos têm sido desenvolvidos para a determinação quantitativa de sedimentos fluviais, através de técnicas de previsão. Sediment-Yield Workshop (1972) descreve métodos atualmente empregados na estimativa da produção de sedimentos, uti
lizados por órgãos como Soil Conservation Service, Bureau of Reclamation, Corps of Engineers e outras entidades.

Para a estimativa de sedimentos produzidos por erosão na bacia contribuinte há, basicamente, quatro tipos de aborda
gens:

1) Modelos estatísticos de regressão - Aplicam a técni
ca estatística de regressão para avaliar os parâmetros. O mo
delo mais acessível é a Equação Universal da Perda de Solo (WISCHMEIER & SMITH, 1961). Uma versão desse modelo é apre
sentada por WILLIAMS & BERNDT (1972), no sentido de desenvol

ver um procedimento prático de cálculo.

2) Método do Sedimentograma Unitário - Baseado no procedimento para análise do Hidrograma Unitário de Sherman, REN DON-HERRERO (1974) desenvolveu um método de estimativa de deplúvio, aplicável em rios que apresentam certas características.

3) Modelos de propagação paramétrica - Basicamente, são formados pela combinação de um modelo de propagação de água e outro de sedimentos. Essa combinação é possível graças a relação íntima existente entre água e sedimento. FLEMING (1975) descreve alguns modelos determinísticos utilizados a tualmente.

4) Modelos estocásticos - A abordagem estocástica do problema de sedimentos é determinada pela consideração da característica aleatória do fator precipitação, que atua no processo de erosão do solo. SHEN & LI (1976) apresentam alguns modelos estocásticos desenvolvidos para a análise de sedimentos fluviais.

Os princípios básicos dos quatro diferentes tipos de a abordagem apresentados acima são similares, contendo todos eles, os seguintes passos:

- a) distribuição da precipitação;
- b) modelo chuva-descarga;
- c) modelo descarga-sedimento.

Como a precipitação é aleatória por natureza, deve ser

tratada por um modelo probabilístico. As relações entre precipitação-descarga e descarga-sedimento são basicamente determinísticas, o que sugere a aplicação de modelos matemáticos de propagação. E, por fim, uma relação matemática deve interligar cada passo.

2.6. O método do Sedimentograma Unitário

O método do Sedimentograma Unitário para a estimativa de deplúvio proveniente da superfície da bacia contribuinte foi desenvolvido por RENDON-HERRERO, como trabalho de tese, para obtenção do título de Ph.D., e apresentado na Virginia Polytechnic Institute e State University, Blackburg, Va., em 1972 (RENDON-HERRERO, 1974).

A premissa básica do método é que o Hidrograma Unitário aplicado ao hidrograma de escoamento superficial é análogo na análise do sedimentograma de deplúvio.

De maneira similar à análise do Hidrograma Unitário, é desenvolvida a análise do Sedimentograma Unitário cuja unidade de padrão é 1 tonelada de sedimento, para uma dada duração de precipitação distribuída sobre a área da bacia (RENDON-HERRERO, 1974).

O método é aplicável em pequenas bacias hidrográficas, onde a estimativa de descarga de sedimentos é possível em função da precipitação. A bacia deve ser pequena para se poder

supor a uniformidade espacial da chuva. Deve, também, apresentar um tipo de solo predominantemente constituído de argila e silte, a fim de produzir sedimentogramas com forma aproximadamente paralela ao hidrograma correspondente.

RENDON-HERRERO concluiu que o método do Sedimentograma Unitário é o procedimento mais efetivo na estimativa de deplúvio, tendo em vista a relação íntima existente entre o deplúvio e precipitação efetiva.

A obtenção do gráfico unitário, análoga a do Hidrograma Unitário, segue os seguintes passos, considerando-se chuvas isoladas:

- 1º) cálculo do volume de água precipitada sobre a bacia;
- 2º) separação dos componentes dos hidrograma e Sedimentograma produzidos;
- 3º) cálculo dos volumes de água e de sedimento provenientes do escoamento superficial;
- 4º) cálculo da precipitação efetiva e sedimento efetivo mobilizado;
- 5º) redução do sedimentograma produzido pelo evento em termos de Sedimentograma Unitário.

As ordenadas do Sedimentograma Unitário são dadas em Km^2/dia . A multiplicação dessas ordenadas pelo sedimento efetivo mobilizado, dado em t/Km^2 , resultará no sedimentograma de deplúvio, cujas ordenadas resultarão em t/dia .

Entretanto, quando se aplica o Sedimentograma Unitário

para a estimativa de sedimentogramas de deplúvio, não é previamente conhecida a quantidade de sedimento mobilizado, o que impossibilita a determinação do índice de sedimento efetivo mobilizado. Para suprir essa deficiência, é construída uma relação entre a precipitação efetiva e o sedimento efetivo mobilizado, possibilitando, isso, a aplicação do método.

RENDON-HERRERO (1974) aplicou o método do Sedimentograma Unitário na bacia hidrográfica do rio Bixler e estimou a produção de deplúvio com 17,6% de erro de estimativa.

2.7. Obtenção de dados sedimentométricos

O desenvolvimento de métodos e a utilização de técnicas de estimativa de sedimentos fluviais exige a determinação quantitativa, no campo, dos sedimentos transportados pelo rio.

Existem vários tipos de equipamentos utilizados na coleta de amostras, os quais foram desenvolvidos com base na análise e compreensão dos fenômenos da erosão, transporte e deposição.

Muitas técnicas de medidas de sedimentos são, atualmente, disponíveis (ANDERSON, 1975). A adoção de uma técnica específica é função do equipamento, do local de medição, dos reursos disponíveis, e representatividade da amostra no tempo, com relação à variação do evento causador do sedimento.

A precisão da determinação de descarga de sedimentos em um rio, depende, não somente dos métodos de campo e do equipamento utilizados, mas também do conhecimento da distribuição dos sedimentos no escoamento (TASK COMMITTEE, 1969a).

Conforme NORDIN & RICHARDSON, (1971), sedimentos finos em suspensão (diâmetro menor que 0,062 mm) são, normalmente distribuídos uniformemente com relação à vertical e à lateral na secção transversal dos rios, e são denominados deplúvio. A distribuição granulométrica do deplúvio não se relaciona à do material que compõe o leito do rio, e o seu transporte não é afetado diretamente pelas propriedades do escoamento, mas sim pela disponibilidade de suas partículas na bacia contribuinte.

Medidas adequadas de sedimentos em suspensão podem fornecer valores de descarga fluvial total de sedimentos em suspensão e a distribuição da concentração de sedimentos em relação ao tempo ou volume de água.

As medições frequentemente realizadas em estudos de sedimentos fluviais são as de (ANDERSON, 1975):

- a) depósito de sedimentos em reservatórios ou canais;
- b) concentração de sedimentos em suspensão em rios;
- c) movimento do material de fundo do rio.

Conforme TASK COMMITTEE (1969a), o tipo de instalação de campo requerido para coleta de amostras, para determinação de descarga de sedimentos em suspensão, depende, principalmente,

do tamanho do rio e da precisão desejada.

2.7.1. Técnicas comumente usadas na coleta de amostras da suspensão em rios.

O transporte de sedimentos fluviais é, geralmente, considerado em duas categorias: sedimentos em suspensão e sedimentos de fundo. Sedimentos em suspensão em rios são comumente medidos, devido a sua importância para a qualidade da água e também por serem considerados como valioso índice na determinação da descarga total de sedimentos e da futura deposição.

Valores de concentração de sedimentos em suspensão são, comumente, obtidos de acordo com um dos seguintes esquemas. A frequência de coleta de amostras e o número de verticais na seção transversal do rio dependem do objetivo do estudo e da precisão desejada (TASK COMMITTEE, 1969a):

1) Amostras de integração vertical, coletadas em verticais de seções transversais de rios, representando áreas de igual fração da vazão. Nesse procedimento, a velocidade de trânsito do equipamento não precisa, necessariamente, ser igual para diferentes verticais. A concentração representativa da seção transversal do rio é, então, a concentração média das verticais amostradas.

2) Amostras de integração vertical, coletadas em verticais equi

distantes na secção transversal do rio. As velocidades de trânsito do instrumento devem, necessariamente, serem iguais para todas as verticais. E o valor da concentração será obtido pela composição de todas as amostras parciais coletadas.

3) Amostras puntuais, de profundidades selecionadas em verticais, representando áreas de igual fração da vazão.

Na secção de medição, onde a variação da concentração é mínima, dados precisos podem ser obtidos por um programa de amostragem rotineira em uma vertical, utilizando-se equipamento de integração vertical. Esse programa é complementado por uma programa periódico de coleta em várias verticais.

A frequência de medições periódicas é função da precisão desejada, número de eventos e características do canal fluvial na secção de referencia. Frequentes medições, particularmente as de períodos de cheia, elevam a precisão dos registros.

Em pequenos rios, amostras podem ser coletadas a vau e, em pontes, com equipamentos operados manualmente. Nas secções de medição em pontes, um abrigo é conveniente quando se deseja registros diários de concentração.

Dados sobre a distribuição granulométrica dos sedimentos fluviais são obtidos de amostras selecionadas para serem representativas das condições de descargas de água e sedimentos. Amostras para a análise granulométrica podem ser obtidas daquelas coletadas para a determinação das concentrações, ou daquelas coletadas especificamente para esse objetivo (TASK

COMMITTEE, 1969b).

2.7.2. Equipamentos empregados na coleta de amostras da suspensão

Embora existam muitos métodos e instrumentos para a de terminação da concentração de sedimentos em suspensão (TASK COMMITTEE, 1969b; NORDIN & RICHARDSON, 1971), o uso de recipi entes é ainda o procedimento comumente empregado. Equipame ntos de coleta de sedimentos em suspensão podem ser classifi cados em grupos , entre os quais os mais importantes são (STICHLING, 1969):

- a) amostrador vertical instantâneo;
- b) amostrador horizontal instantâneo;
- c) garrafa coletora;
- d) bomba amostradora portátil;
- e) amostrador de ponto (US P-61, US P-63, US P-50);
- f) amostrador de integração vertical (US DH-48, US DH-59, US D-49);
- g) amostrador Delft;
- h) bomba amostradora automática.

Atualmente, em nosso país, já é disponível uma grande variedade de equipamentos de coleta de amostras de sedimentos fluviais (HIDROLOGIA, s.d; HIDROCEAN, s.d.).

O equipamento comumente utilizado na determinação da

concentração de sedimentos em suspensão é o amostrador de integração vertical.

Amostradores de integração vertical são projetados para acumular uma mistura de água e sedimento e para serem operados em movimento descendente e ascendente dentro do escoamento, com uma velocidade de trânsito uniforme. Durante o trãnsito, a velocidade de tomada no bocal é aproximadamente igual à velocidade local do rio. Na prática, o tempo de trãnsito deve ser ajustado de tal forma que o recipiente não fique completamente cheio, evitando-se erros por recirculação.

Tal equipamento necessita no mínimo um operador para efetuar a coleta de amostra. Desta forma, quando se deseja obter amostras da suspensão em locais de difícil acesso, ou em caso da impossibilidade de permanência do operador no local da coleta para obtenções contínuas de amostras em períodos de cheia, o referido equipamento mostra-se inadequado. Para suprir essa deficiência, um tipo particular de amostrador automático tem sido desenvolvido (INTER-AGENCY COMMITTEE, 1961; KORNITZ, 1973) como equipamento auxiliar, na obtenção de amostras de sedimento em suspensão, em rios de rápidas alterações de regime, particularmente de áreas remotas, onde não se pode contar com o serviço de um observador permanente.

O "amostrador de nível fixo" (single stage sampler), consiste de um simples recipientes equipado com bocais de tomada, que coleta amostras de sedimentos em suspensão automática

camente (sem atenção imediata), sob o princípio de sifão, quando o nível d'água se eleva. Essas amostras são obtidas em níveis específicos, e próximas da superfície da água.

O INTER-AGENCY COMMITTEE (1961) desenvolveu vários modelos desse equipamento, para operar conforme as condições apresentadas na coleta. Estudos de laboratório indicaram uma aceitável precisão de operação, para uma grande gama de condições.

A eficiência de operação desses equipamentos pode ser afetada por condições adversas antes, durante e após a coleta. Antes da coleta, água pode condensar-se no recipiente. Durante a coleta a velocidade no bocal de tomada pode não ser igual à velocidade local do rio, devido a má orientação do bocal em relação à corrente, ou devido aos distúrbios causados pelo equipamento, seu suporte ou estrutura de proteção. Após a coleta, a amostra pode ser contaminada pela recirculação de água através do recipiente, em condições anormais.

Entretanto, quando utilizados cuidadosamente, esse tipo de equipamento pode fornecer informações valiosas sobre a concentração de sedimentos em suspensão.

O INTER-AGENCY COMMITTEE (1961), descreve as vantagens e desvantagens do amostrador de nível fixo.

Vantagens:

a) não necessita da presença do operador durante a coleta

ta;

- b) as amostras podem ser obtidas em níveis pré-determi
nados;
- c) equipamento de construção barata;
- d) a amostra pode ser deixada por alguns dias, após a
coleta, sem alteração significativa.

Desvantagens:

- a) as amostras são coletadas próximo à superfície da á
gua, necessitando, para determinadas situações, ajus
tamento à distribuição vertical;
- b) as amostras são usualmente obtidas próximo à margem
ou pilar, necessitando para determinadas situações,
ajustamento à distribuição lateral;
- c) a natureza do equipamento limita o tamanho e orientaç
ão do bocal, o que pode levar a uma amostragem não
precisa para areias;
- d) água de condensação pode acumular-se no recipiente
antes da coleta;
- e) vandalismo e detritos freqüentemente criam problemas
na operação.

Amostradores de nível fixo constituem-se de equipament
os altamente úteis na coleta de amostras da suspensão, quand
o os valores de concentração em pontos próximos a superfíc
ie da água podem ser considerados como representativos de
toda a vertical, e também quando os métodos usuais são impraç
o

ticáveis. Esses equipamentos são adequados na obtenção de a mostras de deplúvio, visto que este é distribuído uniformemente na secção transversal do rio.

2.7.3. Procedimentos de laboratório para a determinação da concentração e a análise granulométrica

De acordo com NORDIN & RICHARDSON (1971), a concentração de sedimentos (C) é definida como a razão entre o peso ou volume do sedimento descarregado (Q_s) e a descarga total da mistura água-sedimento (Q) tal que:

$$Q_s = Q \cdot C$$

A determinação da concentração de sedimentos pode ser feita pela relação entre o peso do sedimento e (a) o peso da amostra água-sedimento, (b) o peso da água na amostra água-sedimento, ou (c) o peso da água pura de volume igual da amostra. A descarga de sedimento, medida por concentração, é usualmente, determinada pela primeira técnica (PORTERFIELD, 1972).

A concentração é dada em miligramas de sedimento por litro de mistura água-sedimento. Entretanto, por conveniência, é determinada em laboratório em partes por milhão (ppm), que é o peso seco do material em suspensão (em mg) vezes um milhão, igual ao peso da mistura água-sedimento (em Kg).

O aumento da concentração aumenta a densidade da mistu

ra, e os valores de laboratório em ppm devem ser corrigidos por um coeficiente (c), quando a concentração ultrapassa 16000 ppm (PORTERFIELD, 1972), tal que:

$$\text{mg/l} = c \cdot \text{ppm}$$

A Tabela nº 01 mostra os valores do coeficiente de correção (c).

Tabela Nº 01. Coeficiente (c) para correção da concentração

Concentração (ppm)	(c)	Concentração (ppm)	(c)
0 - 15.900	1,00	322.000 - 341.000	1,26
16.000 - 46.800	1,02	342.000 - 361.000	1,28
46.900 - 66.500	1,04	362.000 - 380.000	1,30
76.600 - 105.000	1,06	381.000 - 399.000	1,32
106.000 - 133.000	1,08	400.000 - 416.000	1,34
134.000 - 159.000	1,10	417.000 - 434.000	1,36
160.000 - 185.000	1,20	435.000 - 451.000	1,38
186.000 - 210.000	1,14	452.000 - 467.000	1,40
211.000 - 233.000	1,16	468.000 - 483.000	1,42
234.000 - 256.000	1,18	484.000 - 498.000	1,44
257.000 - 279.000	1,20	499.000 - 514.000	1,46
280.000 - 300.000	1,22	515.000 - 528.000	1,48
301.000 - 321.000	1,24	529.000 - 542.000	1,50

No sistema métrico, a vazão é dada em metros cúbicos, por segundo, e a descarga de sedimentos em toneladas, por dia. Se 1 m³ de água pesa 1 t, e o intervalo de tempo é de 24 h, temos:

$$k = \frac{86400 \text{ s/dia} \cdot 1 \text{ t/m}^3}{1.000.000} = 0,0864$$

e a descarga de sedimentos será:

$$Q_s = 0,0864 \cdot Q \cdot C$$

Os métodos comumente utilizados em laboratório, para a determinação da concentração de sedimentos, são o método da evaporação e o método da filtração (TASK COMMITTEE, 1969b)

O método da evaporação é freqüentemente, utilizado quando a concentração excede 2.000 mg/l, para material fino (argila e silte), ou 10.000 mg/l quando a amostra é constituída predominantemente de areia. Esse método é mais lento que o da filtração e requer uma correção, se o conteúdo de sólidos dissolvidos na amostra é alto. Por outro lado, a simplicidade do equipamento e do método, por si, são vantagens evidentes.

A precisão dos valores de descarga de sedimentos depende diretamente da precisão da determinação da concentração e vazão.

Os erros mais freqüentes nos valores de concentração da suspensão ocorrem devido a simples erros no procedimento de coleta da amostra, ou devido ao volume insuficiente de amostras obtidas, ou, ainda, devido à insuficiência do número de amostras para cobrir a natureza aleatória da variação na concentração do sedimento transportado (PORTERFIELD, 1972).

Normalmente, dois tipos de registros de descarga de sedimentos são utilizados:

a) registros diários: são preparados para locais onde

a determinação de concentração de sedimentos e vazão justificam cálculos de descarga diária de sedimentos;

b) registros periódicos: são preparados para locais onde determinações de concentração de sedimentos e vazão não são suficientes para justificar a determinação de descargas diárias de sedimentos ou onde amostras periódicas são obtidos.

A análise granulométrica dos sedimentos, é outro procedimento utilizado em estudos de sedimentos fluviais. Nesse procedimento, é comum apresentar-se um empecilho pelo fato de as amostras de sedimentos em suspensão conterem quantidade insuficiente de material para a análise. Para contornar esse problema, dever-se-ão coletar amostras maiores, quando possível, ou utilizar-se um método de análise mais preciso (STICHLING, 1969).

O estabelecimento da quantidade de amostras a coletar, do método de coleta das amostras e da técnica de análise granulométrica dependem, parcialmente, do objetivo do trabalho, da precisão requerida e das características físicas do sedimento.

Em geral, existem 5 técnicas comumente utilizadas na análise granulométrica, conforme o equipamento empregado (STICHLING, 1969):

- a) do separador de base (botton withdrawal tube);
- b) da pipetagem;

- c) hidrométrico;
- d) do tubo acumulativo visual;
- e) das peneiras.

Amostras com grande variação granulométrica podem ser analisadas pela combinação de técnicas. Material grosseiro pode ser analisado por peneiramento; material de granulometria média, pelo tubo acumulativo visual e material fino, pela técnica da pipetagem.

Devido a pequena quantidade de sedimentos contidos frequentemente em amostras de sedimentos em suspensão, a análise granulométrica, muitas vezes, só é possível para amostras obtidas durante períodos de relativamente altas descargas de sedimento (TASK COMMITTEE, 1969b).

A técnica da pipetagem, para a análise granulométrica, é baseada na aplicação da Lei de Stokes para fluidos viscosos. É um método indireto, de fácil interpretação dos resultados, e utiliza equipamento e técnica simples. É satisfatória para partículas com diâmetro entre 0,0001 a 0,060 mm e concentração entre 3.000 ppm e 10.000 ppm (STICHLING, 1969), portanto, é adequada para a análise granulométrica do deplúvio.

A técnica das peneiras é a mais conhecida técnica utilizada na análise granulométrica de materiais grosseiros, ou seja, de diâmetros maiores que 62 microns. Portanto, a técnica é adequada para análise granulométrica de materiais do leito ou outros depósitos (STICHLING, 1969).

3. ESTIMATIVA DE DEPLÚVIO EM RIOS DE ÁREAS ELEVADAS

As fórmulas de cálculo do transporte de sedimentos fluviais são normalmente aplicadas a rios aluviais (SIMONS & SENTÜRK, 1977). Estas supõem que os sedimentos são originários do leito do rio, e que se movimentam governados pela capacidade de transporte do escoamento. Entretanto, quando os sedimentos são transportados em suspensão e são constituídos de deplúvio, o seu movimento é governado pela disponibilidade de partículas de solo ao transporte, na superfície da bacia drenante. Nesse caso, as fórmulas de transporte de sedimentos tornam-se inadequadas à aplicação.

Por outro lado, os procedimentos para a estimativa do deplúvio, como por exemplo a Equação Universal da Perda de Solo, requerem informações hidrológicas e sedimentométricas que, muitas vezes, não são disponíveis de imediato e que exigem, para a sua obtenção, longos períodos de observação. Além dessas dificuldades, esses métodos são pouco precisos, podendo sua aplicação resultar em erros de estimativa maiores que 100% (RENDON-HERRERO, 1974).

A estimativa de produção de sedimentos de uma bacia hidrográfica é um trabalho que requer a compreensão dos fenômenos envolvidos no processo de produção. Entendemos que a causa dos erros de estimativa a que estão sujeitos os procedi

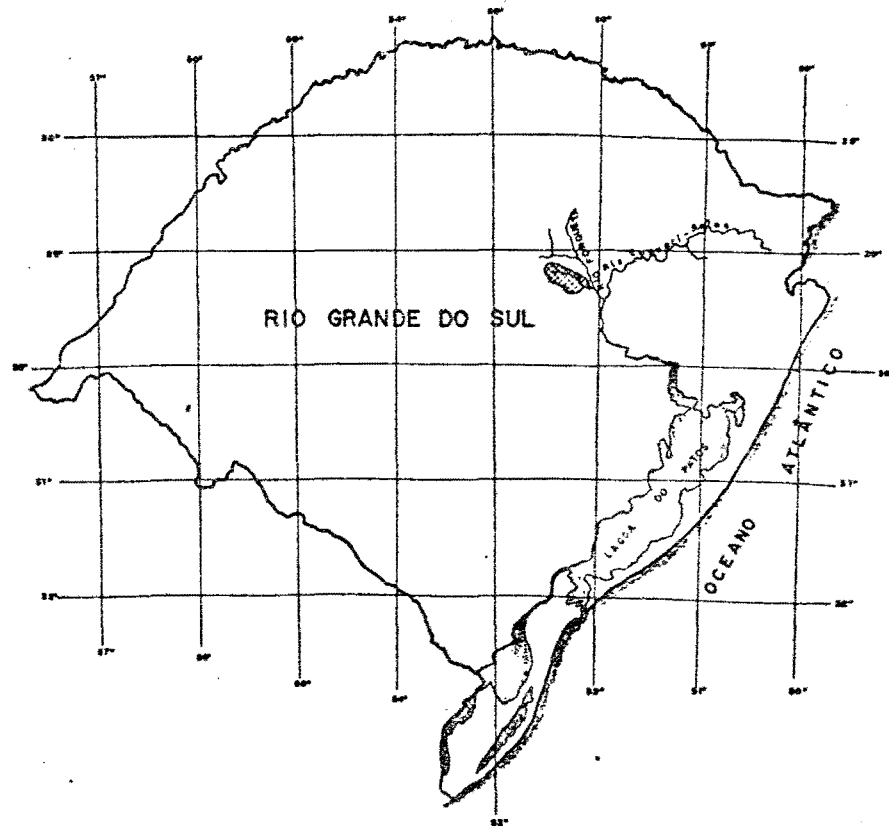
mentos determinísticos, na previsão de sedimentos, está na adoção inadequada dos parâmetros físicos que atuam no processo. A aplicação dos parâmetros é inerente ao procedimento determinístico. A determinação desses parâmetros demandam longos períodos de observação, e, na ocasião de sua aplicação no modelo de previsão, as condições locais podem não coincidir com aquelas vigentes na época da determinação dos parâmetros.

Os procedimentos estatísticos que utilizam séries históricas de dados sedimentométricos estão sujeitos a erros de estimativa devido a não-consideração dos fenômenos envolvidos e das condições intervenientes no processo de produção de sedimentos. Outra dificuldade encontrada na utilização do procedimento estatístico é a escassez de dados sedimentométricos.

Em vista dessas dificuldades, pesquisou-se neste trabalho, um procedimento prático de estimativa de deplúvio que fornecesse resultados aceitáveis, e um procedimento econômico de obtenção de dados sedimentométricos.

3.1. Área de estudo: Bacia do Rio Forquetinha

O trabalho foi desenvolvido e verificada a sua validade na Bacia do Rio Forquetinha, referida no posto fluviométrico denominado Posto-4 (Figura Nº 1).



BACIA DO FORQUETHINA
REF. POSTO - 4

Figura Nº 01 .-
LOCALIZAÇÃO DA BACIA
DO RIO FORQUETHINA

A escolha dessa bacia hidrográfica foi determinada pelo fato de apresentar condições físicas favoráveis ao objetivo a que se propõe este trabalho. A bacia hidrográfica, referida no Posto-4 do Rio Forquetinha, apresenta características físicas aproximadamente uniformes, numa área relativamente pequena, e com boa distribuição de pluviômetros. O Rio Forquetinha, por sua vez, apresenta predominante ocorrência de deplúvio como sedimentos transportados em suspensão.

3.1.1. Descrição Geral da Bacia do Rio Forquetinha

A área em estudo corresponde à Bacia do Rio Forquetinha, referida no posto fluviométrico denominado Posto-4. Esta e outras denominações de estações hidrométricas utilizadas no presente trabalho coincidem com as adotadas nas pesquisas em desenvolvimento (FINEP 01) no Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS. A bacia hidrográfica referida no Posto-4 do Rio Forquetinha será denominada, neste trabalho, Bacia do Rio Forquetinha, por questão de simplicidade.

3.1.1.1. Situação

A Bacia do Rio Forquetinha ocupa uma área de 310 Km² e localiza-se no município de Lajeado, Estado do Rio Grande do Sul, no extremo sul do Brasil (Figura Nº 01). Pertence a re

gião fisiográfica denominada Encosta Inferior do Nordeste e se situa na frente sul do Planalto (BRASIL, 1973).

O Posto-4 do Rio Forquetinha localiza-se nas coordenadas 29°21'50" sul e 52°07'40" a oeste de Greenwich. Situa-se aproximadamente a 15 Km a montante da sua foz com o Rio Forqueta, cujo remanso não atinge o Posto-4. Neste local, denominado Bauer-Eck, o curso d'água é transposto por uma ponte de concreto que liga uma estrada secundária às duas margens.

3.1.1.2. Características físicas

O relevo da Bacia do Rio Forquetinha apresenta-se fortemente ondulado a montanhoso. Um conjunto de grandes elevações forma vales em "V", por onde correm os arroios. A altitude varia entre 50 a 700 metros acima do nível médio do mar.

No Anexo I constam as seguintes características da Bacia do Rio Forquetinha:

- a) perímetro da bacia hidrográfica;
- b) índice de compacidade;
- c) coeficiente de forma;
- d) altitudes características
- e) retângulo equivalente;
- f) declividade média da bacia;
- g) perfil longitudinal do curso d'água;
- h) declividade do perfil longitudinal do curso d'água.

3.1.1.3. Clima

O clima é Subtropical ou Virginiano "Cfa" de Köppen (MORENO, 1961; BRASIL, 1973), com as seguintes características, (BRASIL, 1973):

- a) a temperatura média anual varia entre 19°C a 19,6°C, a temperatura do mês mais quente é superior a 20°C e no mês mais frio, oscila entre 3°C e 18°C;
- b) a precipitação média anual varia entre 1651 a 1976 mm, podendo ocorrer chuvas torrenciais de 137 mm/24 horas. Os períodos secos são os meses de novembro, dezembro e fevereiro, e os períodos sujeitos a geadas estão entre abril e outubro. A região é afetada por nevoeiros;
- c) a insolação média anual está entre 2200 e 2300 horas;
- d) a deficiência de umidade é de 74% (balanço hídrico de Thornthwaite com dados de precipitação, deflúvio, capacidade de armazenamento e evapotranspiração potencial).

Não são conhecidos levantamentos de mapeamento detalhado da geologia e pedologia da área em estudo. Porém existe levantamento de reconhecimento regional (BRASIL, 1973), com as seguintes informações sobre solos, características litológicas e cobertura vegetal da região.

3.1.1.4. Solo

A Bacia do Rio Forquetinha é caracterizada por uma associação de solos Ciríaco e Charrua, desenvolvidos a partir de rochas eruptivas basálticas, ou seja, de basalto e meláfiro (BRASIL, 1973).

Os solos Ciríacos encontram-se nas áreas menos acidentadas e nas partes inferiores dos declives. São denominados Brunizen Avermelhado e apresentam textura argilosa, substrato de basalto e coloração bruno-avermelhado-escura.

Os solos Charrua, por sua vez, situam-se nas posições mais íngremes do relevo geral. São também denominadas Solos Litólicos Eutrotróficos e apresentam textura média e substrato de basalto amigdalóide.

3.1.1.5. Características Litológicas

Rochas efusivas basálticas que cobrem mais de 60% do Estado do Rio Grande do Sul, conhecidas como Trapp do Paraná, e descritas como constituídas por basalto e meláfios (basalto amigdalóide).

3.1.1.6. Cobertura vegetal

A vegetação natural da Bacia do Rio Forquetinha é clas

sificada como "Formações Florestais-Mata Subtropical Alta" (BRASIL, 1973), semelhante às que se desenvolvem em clima tropical, sendo formada por espécimes arbóreas, arbustivas e rasteiras.

Atualmente, em virtude do elevado estágio de utilização da terra, essa vegetação natural tem dado lugar a áreas de cultivo. Em posições mais íngremes, onde se situam os solos Charruas, são ainda encontrados remanescentes da vegetação primitiva.

A agricultura é caracterizada por pequenas propriedades, predominando a cultura de trigo, milho, soja, feijão, mandioca e forrageiras.

3.2. Procedimento quantitativo para estimativa de deplúvio, aplicado a Bacia do Rio Forquetinha

Todo o sedimento que passa em uma secção transversal de um rio deve satisfazer às seguintes condições (EINSTEIN, 1964):

a) deve ter sido erodido, em alguma época na bacia, a montante da secção referida;

b) deve ser transportado, pelo escoamento, do local da erosão para a secção transversal.

Cada uma dessas condições pode limitar a quantidade de sedimentos que passa na secção transversal do rio, dependendo da relativa magnitude de dois controles: a disponibilidade

de do material na bacia e a capacidade de transporte do escoamento.

Como foi visto anteriormente, a parte fina do sedimento fluvial, que é facilmente carregada pelo escoamento em grande quantidade, é governada pela sua disponibilidade ao transporte, na bacia, e é denominada deplúvio. A parte mais grossa do sedimento fluvial, que é mais difícil de ser movida pelo escoamento da água, é limitada pela capacidade de transporte do escoamento entre a origem e a secção considerada e é denominada material do leito.

Ao contrário do material do leito, o deplúvio é representado, no leito do rio, somente em pequena quantidade. Essa quantidade não constitui uma reserva suficiente para suprir uma plena capacidade de transporte, se o fornecimento de tais partículas a montante for temporariamente insuficiente. Conseqüentemente, o transporte, através do trecho, será reduzido a um menor valor de fornecimento. A quantidade de deplúvio em um rio não é, portanto, afetada pela capacidade de transporte do escoamento fluvial.

Com o objetivo de identificar a origem dos sedimentos em suspensão que passam pela secção transversal do Rio Forquetinha (Posto-4), efetuou-se uma análise granulométrica dos materiais constituintes do sistema fluvial.

3.2.1. Análise Granulométrica dos Sedimentos Constituintes do Sistema Fluvial

O reconhecimento dos sedimentos constituintes de um sistema fluvial pode ser efetuado através da análise granulométrica dos materiais das vertentes da bacia contribuinte, do leito do rio e dos sedimentos transportados em suspensão no rio principal.

3.2.1.1. Materiais das vertentes

A análise granulométrica dos solos da superfície das vertentes da bacia hidrográfica fornece informações quanto a sua contribuição aos sedimentos que passam na secção transversal do rio.

Supondo-se que os sedimentos que passam numa secção transversal do rio são provenientes das vertentes, esses materiais devem ter sido erodidos em algum ponto da superfície da bacia contribuinte e transportados, pelo escoamento superficial, do local de origem, até a secção considerada. Em vista disso, amostras de solo foram coletadas a aproximadamente 5 cm abaixo da superfície, evitando-se a inclusão de matéria orgânica.

Basicamente três tipos de amostras de solos foram analisadas. Cada uma representa uma mistura de três amostras co

letadas em diferentes pontos de aproximadamente a mesma altitude, na Bacia do Rio Forquetinha, conforme mostra a Figura Nº 5.

a) amostra S1 - A amostra S1 foi obtida a uma altitude aproximada de 400 metros, onde predomina o solo Charrua, na Bacia do Rio Forquetinha.

b) amostra S2 - A amostra S2 corresponde ao solo Ciríaco, coletada a uma altitude aproximada de 100 metros.

c) amostra S3 - Amostra S3 foi coletada em um afluente do Rio Forquetinha, onde se formou um pequeno depósito de sedimentos erodidos, que eram susceptíveis de transporte, em caso de aumento de fluxo d'água.

A análise granulométrica foi efetuada pela técnica do peneiramento a seco, dos materiais maiores que 0,062 mm, e por pipetagem dos mais finos.

As distribuições granulométricas dos materiais das vertentes, coletados e analisados, e a distribuição, segundo o Levantamento de Reconhecimento de Solos do Estado do Rio Grande do Sul (BRASIL, 1973), estão graficadas na Figura Nº 02.

3.2.1.2. Materiais do leito do rio

A montante do Posto-4, o Rio Forquetinha apresenta um escoamento turbulento, com sucessivas corredeiras.

Na ocasião da coleta de materiais de fundo do Rio For

quetinha, verificou-se que grande parte da extensão do seu leito é revestida de rochas, o que dificultou, de certa forma, a obtenção das amostras de fundo.

As amostras de fundo do rio, para a análise granulométrica foram obtidas por sucessivas coletas a partir do Posto-4, no sentido a montante, a intervalos de distância aproximados de 1 Km (Vide Figura Nº 5).

As amostras foram processadas pela técnica do peneiramento a seco, cujas distribuições granulométricas estão graficadas na Figura Nº 03.

3.2.1.3. Sedimentos em suspensão

Os sedimentos em suspensão para a análise granulométrica consistiram daqueles obtidos em programa rotineiro de amostragem, na secção transversal do Posto-4, durante os eventos de cheia ocorridos em julho e novembro. Esses sedimentos foram agrupados em duas amostras e processadas pela técnica da pipetagem, visto que se constituíam de materiais finos.

Somente duas análises foram efetuadas, face à dificuldade em reunir quantidades mínimas de material para o processamento em laboratório. Entretanto, julgou-se que estas eram suficientes para atingir o objetivo a que se propõe a análise, que é o de comparar as distribuições granulométricas dos

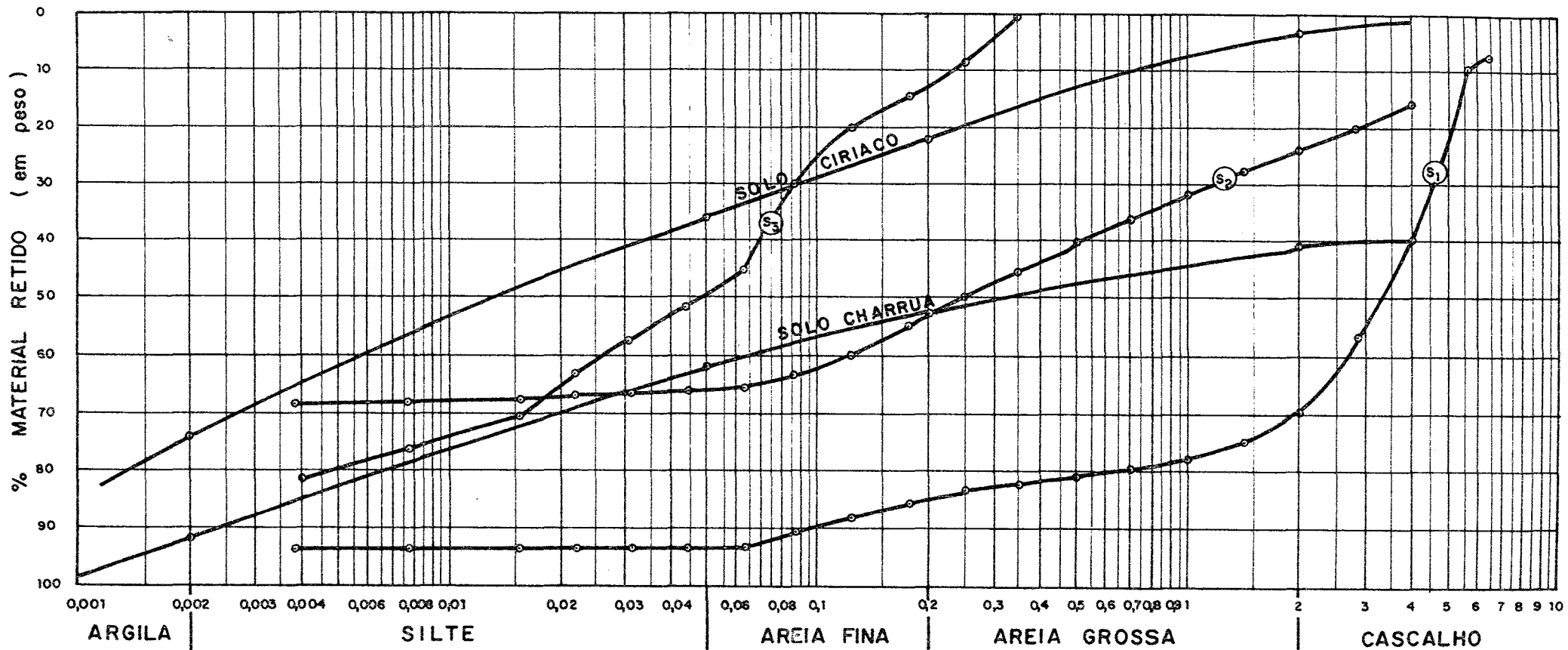


Figura Nº 02.-

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMETRICA
DOS MATERIAIS DAS VERTENTES

de deplúvio, dão lugar a sedimentogramas em que as ordenadas, em tempos correspondentes, são proporcionais às quantidades totais produzidas;

c) a distribuição, no tempo, do deplúvio de uma determinada precipitação, independe de precipitações anteriores.

O Sedimentograma Unitário é uma constante da bacia e reflete suas características atuais de produção de deplúvio na secção considerada.

Portanto, o Sedimentograma Unitário deve ser desenvolvido com dados sedimentométricos recentes, para produzir estimativas de deplúvio que reflitam as condições atuais, ou seja, daquelas sob as quais é obtido o gráfico unitário.

3.2.3. Obtenção dos dados

Os dados necessários para o desenvolvimento do método do Sedimentograma Unitário são a precipitação média sobre a bacia, a vazão e a concentração verificadas na secção transversal de referência. Esses dados foram obtidos na Bacia do Rio Forquetinha durante o período compreendido entre 17 de julho e 17 de novembro de 1978.

3.2.3.1. Precipitação

O método de Sedimentograma Unitário supõe a precipitação uniformemente distribuída sobre a área da bacia, com in

tensidade constante, durante um período unitário. Período unitário é o tempo de duração das precipitações, que é mantido constante durante a obtenção dos Sedimentogramas e Hidrogramas Unitários.

Esses valores são representados pelas precipitações médias, calculadas pelo Método de Thiessen, com dados obtidos pelos pluviômetros distribuídos na bacia hidrográfica.

A análise da bacia hidrográfica determinou uma escolha adequada de postos pluviométricos, mantidos pelo Centro de Hidrologia Aplicada - UFRGS, na Bacia do Forquetinha.

Foram escolhidos 4 postos pluviométricos a saber: Alto Araguari, Morro Gaúcho, Alta Forquetinha e Pedras Brancas, cujas áreas de influência são respectivamente 62 Km², 82 Km², 71 Km² e 95 Km², conforme mostra a Figura Nº 05.

Dados pluviométricos correspondentes ao período compreendido entre 17 de julho e 17 de novembro de 1978 foram analisados para a obtenção das precipitações médias, pelo método de Thiessen.

Nos 4 postos referidos, a coleta de água dos pluviômetros foram realizadas pela manhã, às 7 h, e, à tarde, às 19 horas, o que forneceu alturas pluviométricas acumuladas em 12 horas.

O Método de Thiessen determina a altura pluviométrica média para a bacia, pela média ponderada das alturas pluviométricas individuais dos diversos postos, com relação às suas

- POSTOS PLUVIOMETRICOS
- COLETA DE SOLO
- COLETA DE FUNDO

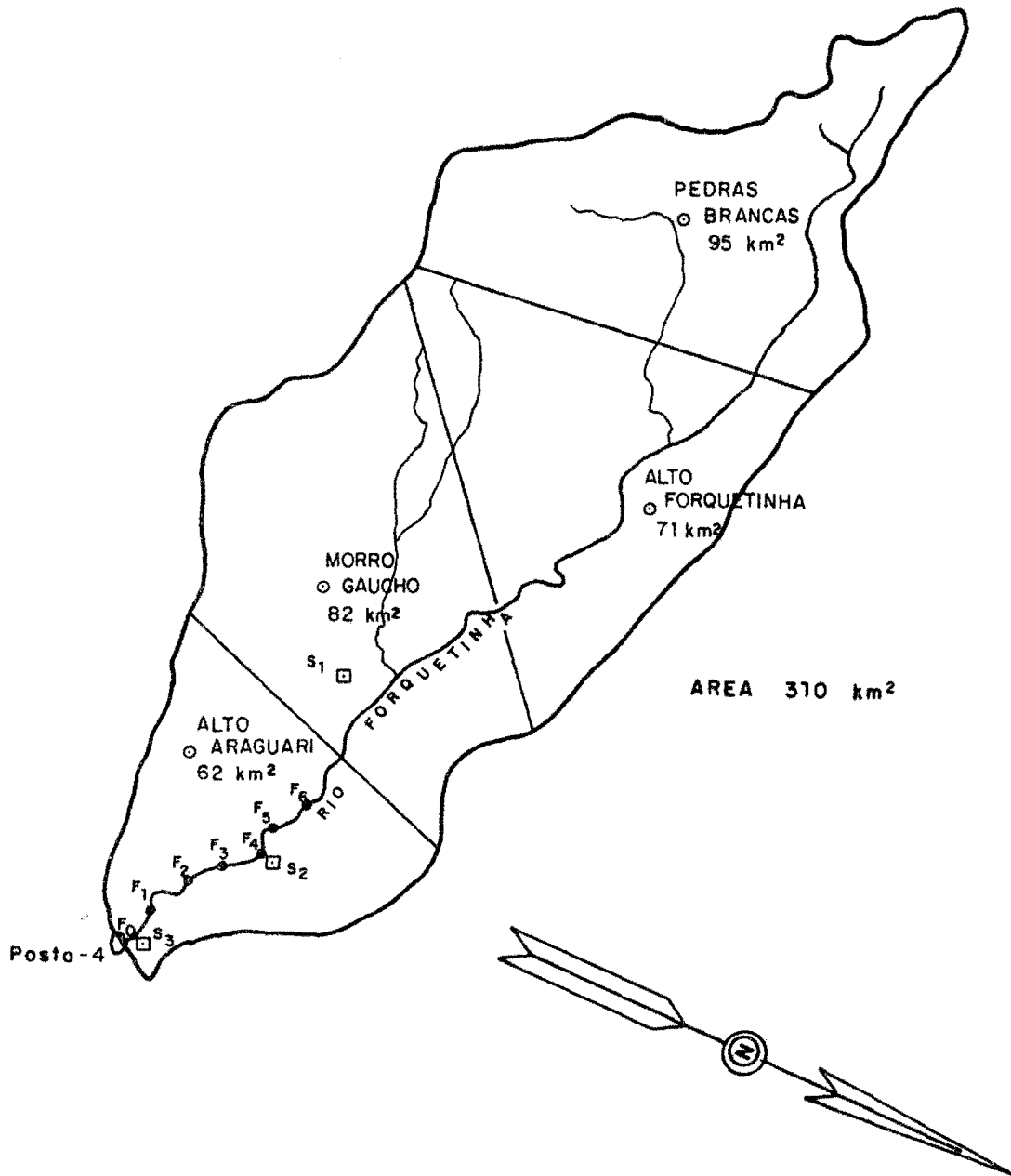


Figura N^o 05.-

POSTOS PLUVIOMETRICOS
Bacia do Rio Forquethinha
ESC. : 1 : 200.000

respectivas áreas de influência: $\overline{PR} = \frac{\sum (PR_i \times A_i)}{\sum A_i}$

onde: \overline{PR} = precipitação média (mm)

PR_i = precipitação em cada posto pluviométrico (mm)

A_i = área correspondente a cada posto pluviométrico (Km^2)

i = índice dos postos pluviométricos

O Método de Thiessen foi aplicado a todas as precipitações, quando estas ocorreram em no mínimo três postos pluviométricos, fornecendo precipitações médias na bacia, de 12 em 12 horas. Esses dados estão contidos na Tabela Nº 04 e graficados na Figura Nº 09.

Uma análise posterior dos hidrogramas e sedimentogramas possibilitou a seleção de períodos de cheia para obtenção dos Sedimentogramas e Hidrogramas Unitários.

A Tabela Nº 02 mostra os valores precipitados em cada posto pluviométrico e a precipitação média na bacia, ocorridos durante os eventos selecionados.

3.2.3.2. Vazão

A Bacia do Rio Forquetinha, considerada no presente estudo, é referida ao ponto fluviométrico e sedimentométrico denominado Posto-4, que é mantido pelo CHA-UFRGS, em convênio

Tabela Nº 02. Determinação da precipitação média (mm) dos e ventos selecionados

DATA	POSTOS PLUVIOMÉTRICOS				Precipit. Média 310 Km ²
	Alto Araguari 62 Km ²	Morro Gaúcho 82 Km ²	Alta Forquetinha 71 Km ²	Pedras Brancas 95 Km ²	
1978					
22/JUL	29,3	33,0	39,5	29,0	33,52
23/JUL	21,0	20,5	16,4	25,0	21,04
14/AGO	3,4 17,8	3,9 17,0	5,4 15,4	3,0 22,0	3,87 18,33
15/AGO	6,4 0,7	8,6 -	6,0 0,9	10,0 2,0	7,99 0,96
30/AGO	28,0	28,0	27,2	29,0	28,12
08/SET	11,9 8,2	26,4 -	26,4 -	19,0 3,0	21,23 2,56
13/SET	5,2	4,0	-	5,0	3,63
14/SET	29,0 1,6	33,3 -	30,2 6,4	29,0 4,0	30,41 3,01
15/SET	4,7	4,7	2,5	2,0	3,37
03/NOV	39,4	52,4	40,7	41,0	43,63

com a FINEP.

O fluviograma do Posto-4 é obtido pelas leituras linimétricas efetuadas três vezes ao dia: às 7 h, 12 h e 19 horas. Os dados linimétricos do período compreendido entre 17 de julho e 17 de novembro de 1978 foram analisados e transformados em descargas através da curva-chave, desenvolvida pelo CHA-UFRGS (Pesquisa FINEP-01).

A curva-chave do Posto-4, apesar de não abranger altos níveis d'água, foi suficiente para aqueles ocorridos no período deste estudo. A curva-chave é apresentada na Tabela Nº 03 e Figura Nº 06.

Os valores das leituras linimétricas foram, após verificação de erros grosseiros, transformados em descarga d'água através da curva-chave. Os dados instantâneos de vazão constam na Tabela Nº 04, os quais estão graficados em relação ao tempo, juntamente com dados pluviométricos e sedimentométricos na Figura Nº 09.

3.2.3.3. Concentração de sedimentos em suspensão

Os valores de concentração de sedimentos em suspensão foram determinados no Laboratório de Sedimentos do IPH-UFRGS, pela análise das amostras de mistura água-sedimento. Estas foram coletadas na seção transversal do Posto-4, no Rio Forquetinha, durante o período compreendido entre 17 de julho a

Tabela Nº 03. Relação Nível-Descarga

Posto-4/Rio Forquetinha

h (cm)	Q (m ³ /s)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
50	0,60	0,73	0,86	0,99	1,12	1,25	1,38	1,51	1,64	1,77
60	1,90	2,04	2,18	2,32	2,46	2,60	2,74	2,88	3,02	3,16
70	3,30	3,45	3,60	3,65	3,90	4,05	4,20	4,35	4,50	4,65
80	4,80	4,98	5,16	5,34	5,52	5,70	5,80	6,06	6,24	6,42
90	6,60	6,82	7,04	7,26	7,48	7,70	7,92	8,14	8,36	8,58
100	8,80	9,04	9,28	9,52	9,76	10,00	10,24	10,48	10,72	10,96
110	11,20	11,48	11,76	12,04	12,32	12,60	12,88	13,16	13,44	13,72
120	14,00	14,32	14,64	14,96	15,28	15,60	15,92	16,24	16,56	16,88
130	17,20	17,52	17,84	18,16	18,48	18,80	19,12	19,44	19,76	20,08
140	20,40	20,76	21,12	21,48	21,84	22,20	22,56	22,92	23,28	23,64
150	24,00	24,40	24,80	25,20	25,60	26,00	26,40	26,80	27,20	27,60
160	28,00	28,40	28,80	29,20	29,60	30,00	30,40	30,80	31,20	31,60
170	32,00	32,40	32,80	33,20	33,60	34,00	34,40	34,80	35,20	35,60
180	36,00	36,40	36,80	37,20	37,60	38,00	38,40	38,80	39,20	39,60
190	40,00	40,42	40,84	41,26	41,68	42,11	42,53	42,95	43,37	43,79
200	44,21	44,63	45,05	45,48	45,90	46,32	46,74	47,16	47,59	48,01
210	48,43	48,85	49,27	49,69	50,11	50,54	50,96	51,38	51,80	52,22
220	52,64	53,06	53,48	53,91	54,33	54,75	55,17	55,59	56,02	56,44
230	56,86	57,28	57,70	58,12	58,54	58,97	59,39	59,81	60,23	60,65
240	61,07	61,49	61,91	62,34	62,76	63,18	63,60	64,02	64,45	64,87
250	65,29	65,71	66,13	66,55	66,97	67,40	67,82	68,24	68,66	69,08
260	69,50	69,92	70,34	70,76	71,18	71,61	72,03	72,45	72,87	73,29
270	73,71	74,13	74,55	74,98	75,40	75,82	76,24	76,66	77,09	77,51
280	77,93	78,35	78,77	79,19	79,61	80,04	80,46	80,88	81,30	81,72
290	82,14	82,56	82,98	83,41	83,83	84,25	84,67	85,09	85,52	85,94
300	86,36	86,78	87,20	87,62	88,04	88,47	88,89	89,31	89,73	90,15
310	90,57	90,99	91,41	91,84	92,26	29,68	93,10	93,52	93,95	94,37
320	94,79	95,21	95,63	96,05	96,47	96,90	97,32	97,74	98,16	98,58
330	99,00	99,42	99,84	100,26	100,68	101,11	101,53	101,95	102,37	102,79
340	103,21									

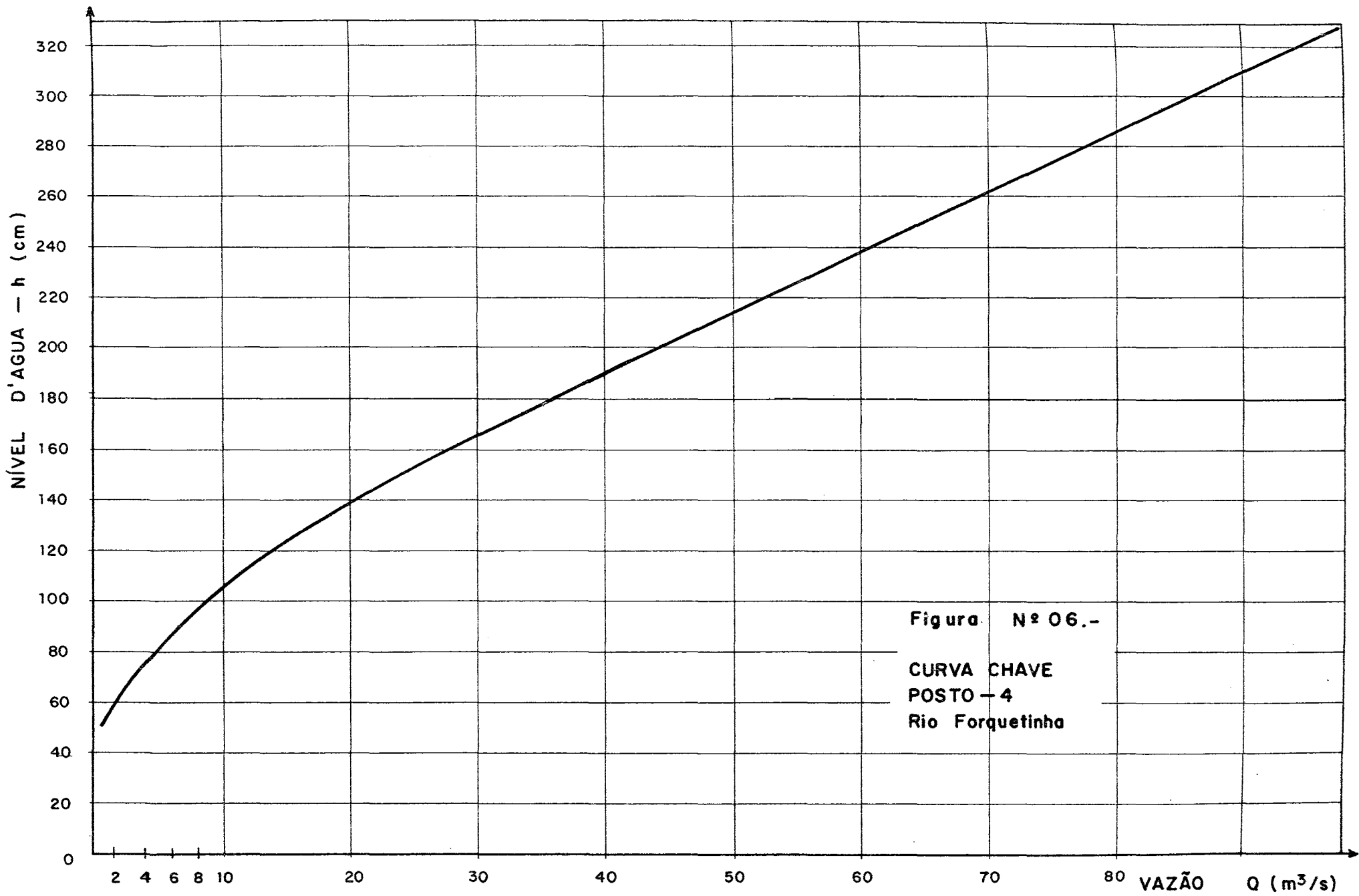


Figura. N.º 06.-

CURVA CHAVE
POSTO - 4
Rio Forquetinha

17 de novembro de 1978.

3.2.3.3.1. Procedimentos de Campo

As operações sedimentométricas realizadas no Posto-4 tiveram como objetivo a determinação das concentrações de sedimentos em suspensão na secção transversal da Bacia do Rio Forquetinha.

A quase totalidade dos sedimentos transportados em suspensão na secção transversal do Posto-4 é constituída de deplúvio, proveniente das vertentes da bacia, por ocasião das precipitações ocorridas. Isto é verificado pela análise dos valores de concentração ao longo da secção transversal e análises granulométricas dos materiais constituintes do leito, em suspensão, e das vertentes da bacia hidrográfica.

Durante o período em estudo, foram realizadas basicamente dois programas de coleta de amostras:

- a) amostragem rotineira;
- b) amostragens periódicas.

Amostragem rotineira - Um reconhecimento preliminar do comportamento do Rio Forquetinha, com relação ao transporte de sedimentos, sugeriu a ocorrência predominante de deplúvio como sedimentos em suspensão.

Como o deplúvio é considerado uniformemente distribuído na secção transversal de um curso d'água, a localização exa

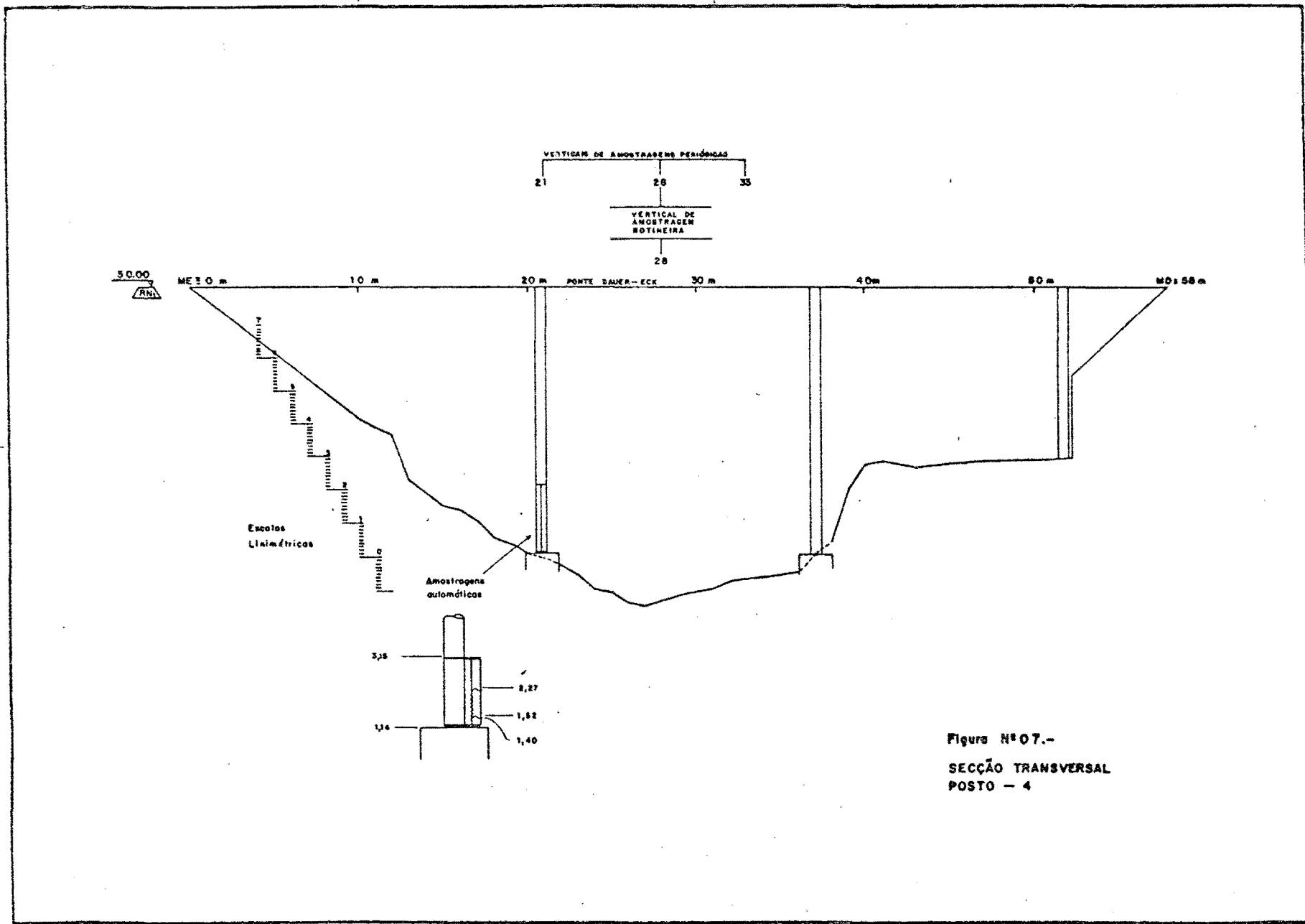
ta do ponto de amostragem não é de particular significância. Portanto, selecionou-se uma vertical de amostragem rotineira, levando-se em conta somente a posição do fluxo principal na secção transversal.

A vertical escolhida é a correspondente ao N^o 28 conforme mostra a Figura N^o 07. Nessa vertical foi levado um programa de coleta de duas amostras diárias de mistura água-sedimento, às 7 h da manhã e às 19 horas, durante o período em estudo. As coletas foram realizadas por um observador local com um equipamento de integração vertical, construído de forma a facilitar a operação, sem, no entanto, prejudicar a qualidade da amostra.

O equipamento é constituído de um corpo de aço, com forma aerodinâmica para se orientar na direção do fluxo quando introduzido na corrente. Suporta uma garrafa padrão de 400 ml, e bocais de tomada de amostra e saída de ar dispostos em sentidos contrários. Esse conjunto é facilmente manuseado pelo observador através de um sistema de roldana, adaptada à ponte na vertical desejada. A Foto N^o 3 da Figura N^o 38 mostra esse equipamento.

Um dos cuidados dispensados pelo observador foi o de evitar o enchimento pleno da garrafa durante a operação, o que causaria a recirculação da mistura, mascarando a representatividade da amostra.

A eficiência do equipamento utilizado no programa de a



mostragem rotineira foi verificada em amostragens periódicas, utilizando-se do equipamento de integração vertical US-D 49, aferido.

Amostragens periódicas - O programa de amostragens periódicas foi realizado com o objetivo de conhecer a distribuição de sedimentos em suspensão na secção transversal do Posto-4, e de verificar a eficiência do equipamento utilizado pelo observador.

Esse programa de coleta foi executado por técnicos do Laboratório de Sedimentos do IPH-UFRGS e pelo autor, em visitas periódicas ao Posto-4, durante diferentes estágios do rio, ou seja, em diferentes níveis de concentração de sedimentos em suspensão. Utilizou-se, nesse programa, o amostrador US-D 49. A Foto Nº 1 da Figura Nº 38 mostra uma operação do programa periódico de coleta de amostras.

A Figura Nº 08 mostra as variações dos valores de concentração de sedimentos em suspensão verificadas em três verticais da secção transversal, e em três diferentes níveis de concentração. Duas amostras foram obtidas em cada vertical, correspondendo ao equipamento utilizado pelo observador em programa rotineiro e o amostrador US-D 49. As verticais a mostradas correspondem às enumeradas na Figura Nº 07.

A eficiência do amostrador de integração vertical utilizado pelo observador em programa rotineiro é verificada pela comparação com os dados obtidos em programa periódico, utili

zando-se o amostrador de integração vertical US-D 49.

Um estudo estatístico de correlação é feito com valores obtidos pelos dois equipamentos, conforme consta no Anexo II.

A reta de regressão dos mínimos quadrados apresentada na Figura Nº 45 é obtida de uma amostra pequena, porém abrangendo uma boa amplitude de variação dos valores de concentração, como se pode observar na Figura Nº 08.

O estudo estatístico apresentou o coeficiente de correlação $r = 0,974$ e coeficiente de determinação $r^2 = 0,949$. Em vista desses valores, e considerando-se que o leito do Rio Forquetinha, no Posto-4, é constituído de rocha e de pedras de dimensões variadas, e que dificilmente entram em suspensão por forças do escoamento, as pequenas variações nos valores de concentração de sedimentos em suspensão, obtidos pelos dois equipamentos, ao longo da secção transversal, sugerem ser devidas à natureza aleatória do transporte de sedimentos, como descrita por PORTERFIELD (1972).

3.2.3.3.2. Procedimentos de Laboratório

As amostras de sedimentos em suspensão, obtidas em programas rotineiro e periódicos, foram processadas no Laboratório de Sedimentos do IPH-UFRGS, e determinadas as suas concentrações.

Concentração - A concentração de sedimentos de uma mis

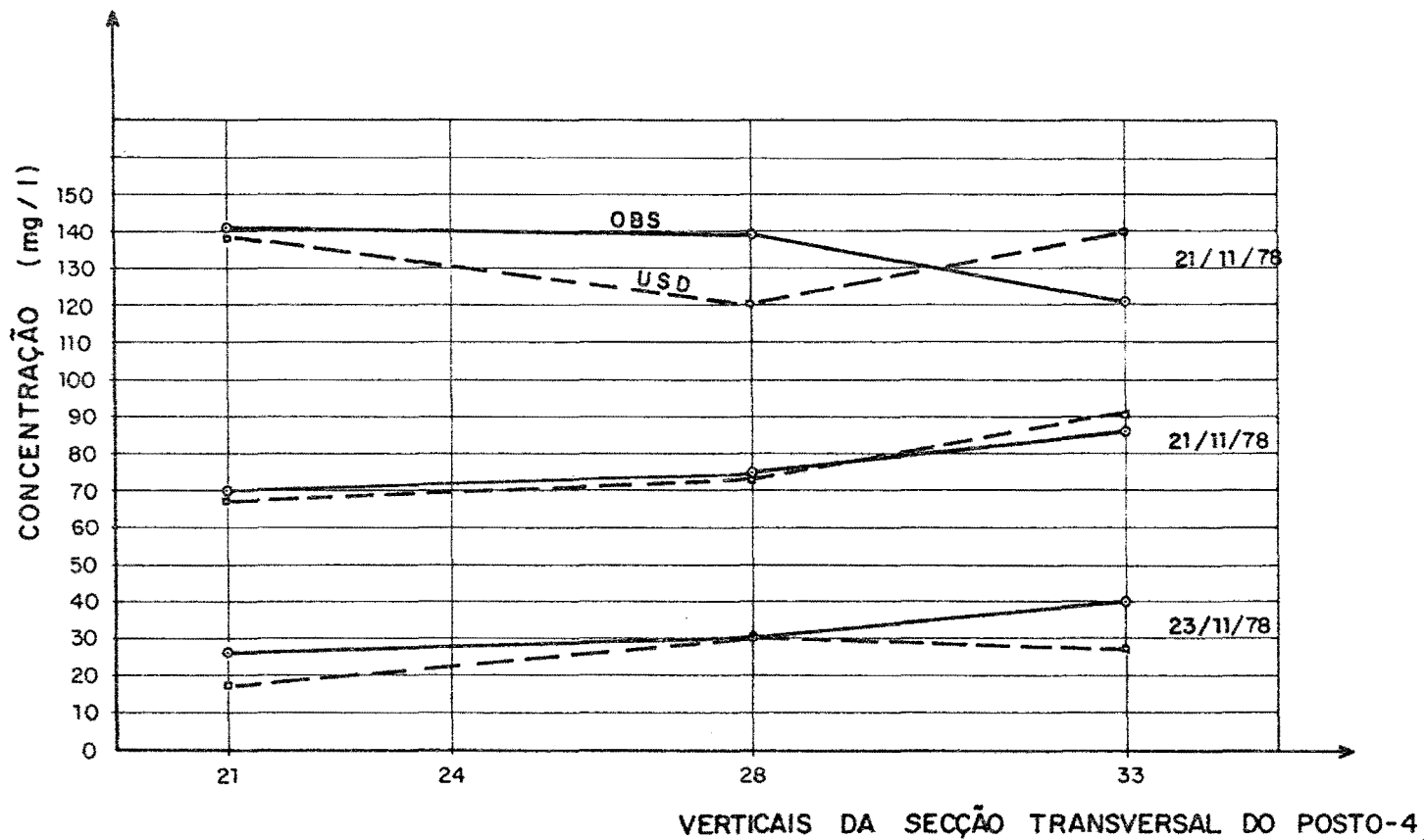


Figura N^o 08 .-

VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE
 SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO NA
 SECÇÃO TRANSVERSAL. POSTO-4

tura água-sedimento é definida como sendo a razão entre o peso, ou volume, de sedimento descarregado (S) e a descarga total da mistura água-sedimento (Q):

$$C = \frac{S}{Q}$$

A determinação da concentração foi feita pela relação entre o peso do sedimento e o peso da amostra água-sedimento.

A concentração é fornecida pelo laboratório em ppm (partes por milhão), que é o peso seco do material em suspensão (em mg) vezes um milhão, igual ao peso da mistura água-sedimento (em Kg). Porém, se a densidade da mistura for grande, ou seja, concentração maior que 16.000 ppm, os valores em ppm devem ser corrigidos por um coeficiente (c), tal que:

$$\text{mg/l} = c \times \text{ppm}$$

No presente trabalho, não houve necessidade dessa correção aos valores da concentração.

A técnica utilizada no laboratório para a determinação da concentração foi o da evaporação, com a devida correção de sólidos dissolvidos.

Valores de concentração de sedimentos em suspensão do programa rotineiro constam na Tabela Nº 04 e graficados em relação ao tempo, na Figura Nº 03.

Concentrações obtidas no programa de coleta periódica estão apresentados na Tabela Nº 28 do Anexo II.

Tabela Nº 04. Dados básicos

JUL. 1978	7:00 h				12:00 h		19:00 h			
	Precipit. média (mm)	Nível (m)	Vazão (m ³ /s)	Concentração (mg/l)	Nível (m)	Vazão (m ³ /s)	Precipitação média (mm)	Nível (m)	Vazão (m ³ /s)	Concentração (mg/l)
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17	-	-	-	-	-	-	15,62	0,60	1,90	11,67
18	-	0,72	3,60	38,58	0,74	3,90	-	0,76	4,20	45,17
19	-	0,72	3,60	12,17	0,70	3,30	7,19	0,72	3,60	20,61
20	14,35	0,96	7,92	113,53	1,00	8,80	16,64	1,00	8,80	76,04
21	7,92	1,62	28,80	341,50	1,52	24,80	1,47	1,42	21,12	141,69
22	32,52	3,02	87,20	864,48	2,40	61,07	-	1,85	38,00	116,66
23	-	1,40	20,40	52,58	1,34	18,48	21,04	1,58	27,20	209,53
24	-	1,64	29,60	89,98	1,50	24,00	-	1,35	18,80	36,57
25	-	1,20	14,00	22,96	1,17	13,16	-	1,10	11,20	32,66
26	-	1,00	8,80	13,57	0,96	7,92	1,07	0,94	7,48	24,45
27	15,19	1,00	8,80	13,85	1,04	9,76	11,76	1,06	10,24	20,73
28	0,45	1,17	13,16	31,96	1,18	13,44	-	1,16	12,88	18,08
29	-	1,09	10,96	8,93	1,06	10,24	-	1,04	9,76	16,11
30	9,20	1,04	9,76	34,82	1,02	9,28	-	1,00	8,80	16,91
31	-	0,96	7,92	3,81	0,94	7,48	-	0,94	7,48	0,56

Tabela Nº 4. Dados básicos

AGO. 1978	7:00 h				12:00 h		19:00 h			
	Precipit. média (mm)	Nível (m)	Vazão (m ³ /s)	Concentração (mg/l)	Nível (m)	Vazão (m ³ /s)	Precipitação média (mm)	Nível (m)	Vazão (m ³ /s)	Concentração (mg/l)
1	-	0,90	6,60	0	0,88	6,24	-	0,86	5,88	0
2	-	0,80	4,80	0	0,79	4,65	-	0,79	4,65	0
3	-	0,76	4,20	0	0,74	3,90	-	0,74	3,90	0
4	-	0,72	3,60	0	0,70	3,30	-	0,69	3,16	0
5	-	0,67	2,88	5,11	0,66	2,74	-	0,66	2,74	7,98
6	-	0,64	2,46	3,99	0,64	2,46	-	0,63	2,32	5,47
7	-	0,62	2,18	5,34	0,62	2,18	-	0,61	2,04	0
8	-	0,60	1,90	0	0,60	1,90	-	0,59	1,77	0
9	-	0,60	1,90	0	0,60	1,90	8,52	0,58	1,64	0
10	0,83	0,61	2,04	0	0,61	2,04	-	0,60	1,90	0
11	15,94	0,72	3,60	38,59	0,75	4,05	0,86	0,78	4,50	22,66
12	4,84	0,78	4,50	8,48	0,78	4,50	10,87	0,88	6,24	35,53
13	-	1,02	9,28	37,26	1,02	9,28	-	1,08	10,72	16,15
14	3,87	1,02	9,28	7,18	1,06	10,24	18,33	1,20	14,00	75,27
15	7,99	1,76	34,40	113,65	1,87	38,80	0,96	1,82	36,80	67,10
16	-	1,55	26,00	21,92	1,46	22,56	-	1,36	19,12	9,37
17	-	1,21	14,32	2,62	1,17	13,16	-	1,10	11,20	1,49
18	-	1,01	9,04	0	0,97	8,14	-	0,92	7,04	8,48
19	-	0,89	6,42	3,50	0,86	5,88	1,60	0,85	5,70	3,22
20	5,34	0,84	5,52	2,33	0,83	5,34	7,07	0,82	5,16	0
21	2,25	0,87	6,06	6,78	0,88	6,24	-	0,86	5,88	14,55
22	-	0,85	5,70	0	0,84	5,52	-	0,83	5,34	0
23	-	0,81	4,98	0,54	0,80	4,80	-	0,80	4,80	0
24	-	0,77	4,35	0	0,76	4,20	-	0,74	3,90	0
25	-	0,73	3,75	0	0,72	3,60	-	0,71	3,45	0
26	-	0,70	3,30	0	0,69	3,16	-	0,68	3,02	0
27	-	0,67	2,88	0	0,67	2,88	-	0,66	2,74	0
28	-	0,65	2,60	2,57	0,64	2,46	-	0,64	2,46	0
29	9,18	0,67	2,88	26,75	0,68	3,02	-	0,68	3,02	0
30	28,12	0,99	8,58	187,29	1,20	14,00	-	1,39	20,08	91,78
31	-	1,26	15,92	34,15	1,20	14,00	-	1,14	12,32	9,46

Tabela Nº 4. Dados básicos

SET. 1978	7:00 h				12:00 h		19:00 h			
	Precipit. média (mm)	Nível (m)	Vazão (m ³ /s)	Concentração (mg/l)	Nível (m)	Vazão (m ³ /s)	Precipitação média (mm)	Nível (m)	Vazão (m ³ /s)	Concentração (mg/l)
1	-	1,06	10,24	0	1,03	9,52	-	1,00	8,80	1,06
2	-	0,93	7,26	0	0,90	6,60	-	0,88	6,24	0
3	2,30	0,84	5,52	0	0,83	5,34	-	0,82	5,16	0
4	-	0,78	4,50	0	0,76	4,20	-	0,77	4,35	0
5	-	0,75	4,05	0	0,74	3,90	-	0,74	3,90	0
6	0,56	0,71	3,45	0	0,70	3,30	-	0,69	3,16	0
7	-	0,68	3,02	0	0,67	2,88	-	0,66	2,74	0
8	21,23	0,81	4,98	29,80	0,91	6,82	2,56	1,01	9,04	104,20
9	-	1,02	9,28	21,70	1,00	8,80	-	0,97	8,14	16,60
10	-	0,94	7,48	4,60	0,92	7,04	-	0,90	6,60	0
11	-	0,86	5,88	0	0,84	5,52	-	0,82	5,16	0
12	-	0,79	4,65	0	0,78	4,50	-	0,76	4,20	0
13	-	0,75	4,05	0	0,74	3,90	3,63	0,72	3,60	0
14	30,41	1,12	11,76	116,90	1,20	14,00	3,01	1,26	15,92	57,50
15	3,37	1,26	15,92	29,50	1,24	15,28	-	1,21	14,32	12,50
16	-	1,14	12,32	6,40	1,11	11,48	-	1,08	10,72	3,10
17	-	1,02	9,28	3,30	0,99	8,58	-	0,96	7,92	0
18	-	0,92	7,04	1,50	0,88	6,24	-	0,86	5,88	4,10
19	-	0,83	5,34	1,00	0,81	4,98	-	0,80	4,80	0,40
20	-	0,76	4,20	1,50	0,76	4,20	0,80	0,74	3,90	0
21	-	0,73	3,75	0	0,70	3,30	-	0,70	3,30	0
22	-	0,68	3,02	0	0,68	3,02	-	0,67	2,88	1,60
23	-	0,66	2,74	0	0,64	2,46	-	0,64	2,46	4,44
24	-	0,63	2,32	4,08	0,63	2,32	-	0,62	2,18	3,03
25	-	0,61	2,04	4,70	0,60	1,90	-	0,60	1,90	4,84
26	-	0,59	1,17	4,70	0,59	1,17	-	0,58	1,64	4,74
27	-	0,58	1,64	5,09	0,57	1,51	-	0,57	1,51	3,31
28	-	0,56	1,38	4,80	0,55	1,25	-	0,58	1,64	3,63
29	-	0,57	1,51	2,85	0,56	1,38	-	0,56	1,25	4,84
30	-	0,55	1,25	3,38	0,55	1,25	-	0,54	1,12	1,60

Tabela Nº 4. Dados básicos

OUT. 1978	7:00 h				12:00 h		19:00 h			
	Precipit. média (mm)	Nível (m)	Vazão (m ³ /s)	Concentração (mg/l)	Nível (m)	Vazão (m ³ /s)	Precipitação média (mm)	Nível (m)	Vazão (m ³ /s)	Concentração (mg/l)
1	-	0,54	1,12	1,86	0,54	1,12	-	0,54	1,12	2,97
2	-	0,53	0,99	1,34	0,53	0,99	-	0,53	0,99	4,73
3	-	0,52	0,86	4,13	0,52	0,86	-	0,52	0,86	2,88
4	24,42	0,60	1,90	4,46	0,60	1,90	-	0,60	1,90	3,35
5	-	0,60	1,90	3,00	0,58	1,64	-	0,57	1,51	3,94
6	-	0,55	1,25	3,50	0,54	1,12	-	0,54	1,12	3,24
7	-	0,53	0,99	3,31	0,52	0,86	-	0,52	0,86	3,68
8	-	0,52	0,86	4,15	0,52	0,86	-	0,51	0,73	4,17
9	-	0,51	0,73	4,08	0,51	0,73	1,07	0,51	0,73	4,41
10	11,25	0,53	0,99	3,49	0,54	1,12	2,44	0,54	1,12	3,35
11	-	0,56	1,38	4,24	0,55	1,25	-	0,54	1,12	4,34
12	-	0,53	0,99	1,67	0,52	0,86	-	0,52	0,86	3,63
13	-	0,51	0,73	4,79	0,51	0,73	-	0,50	0,60	4,31
14	17,44	0,56	1,38	42,41	0,58	1,64	-	0,58	1,64	2,34
15	-	0,58	1,64	8,72	0,57	1,51	-	0,56	1,38	10,65
16	-	0,64	2,46	3,44	0,63	2,32	-	0,63	2,32	3,32
17	-	0,52	0,86	3,66	0,52	0,86	-	0,52	0,86	2,77
18	-	0,51	0,73	7,57	0,51	0,73	-	0,50	0,60	3,93
19	8,01	0,53	0,99	2,69	0,54	1,12	-	0,54	1,12	2,52
20	-	0,54	1,12	3,75	0,53	0,99	-	0,53	0,99	4,60
21	-	0,52	0,86	1,03	0,52	0,86	-	0,51	0,73	5,08
22	-	0,50	0,60	4,39	0,50	0,60	-	0,50	0,60	5,25
23	-	0,49	0,47	4,61	0,49	0,47	-	0,49	0,47	6,36
24	-	0,49	0,47	3,58	0,49	0,47	-	0,49	0,47	4,99
25	14,59	0,50	0,60	2,88	0,50	0,60	-	0,50	0,60	2,96
26	-	0,51	0,73	3,70	0,51	0,63	1,94	0,53	0,99	3,66
27	13,25	0,54	1,12	5,16	0,58	1,64	-	0,58	1,64	1,97
28	-	0,57	1,51	5,61	0,56	1,38	-	0,54	1,12	4,48
29	-	0,53	0,99	4,29	0,53	0,99	7,10	0,53	0,99	5,51
30	5,03	0,54	1,12	4,98	0,55	1,25	12,88	0,56	1,38	14,97
31	8,33	0,66	2,74	400,31	0,71	3,45	1,15	0,76	4,20	111,73

Tabela Nº 4. Dados básicos

NOV. 1978	7:00 h				12:00 h		19:00 h			
	Precipit. média (mm)	Nível (m)	Vazão (m ³ /s)	Concentração (mg/l)	Nível (m)	Vazão (m ³ /s)	Precipitação média (mm)	Nível (m)	Vazão (m ³ /s)	Concentração (mg/l)
1	2,48	0,82	5,16	54,66	0,84	5,52	-	0,84	5,52	41,39
2	-	0,80	4,80	20,06	0,78	4,50	-	0,76	4,20	15,96
3	-	0,72	3,60	14,66	0,77	4,35	43,63	1,12	11,76	359,70
4	-	1,92	40,84	168,56	1,72	32,80	-	1,56	26,40	52,12
5	-	1,31	17,52	30,43	1,23	14,96	-	1,12	11,76	20,59
6	-	1,02	9,28	14,22	0,98	8,36	-	0,94	7,48	10,99
7	-	0,86	5,88	3,52	0,84	5,52	-	0,82	5,16	3,87
8	-	0,77	4,35	3,02	0,76	4,20	-	0,73	3,75	2,82
9	0,92	0,72	3,60	3,03	0,70	3,30	13,25	0,69	3,16	2,87
10	16,37	0,93	7,26	63,52	0,90	6,60	-	0,89	6,42	19,19
11	-	0,83	5,34	19,47	0,80	4,80	-	0,73	3,75	6,19
12	-	0,76	4,20	4,97	0,76	4,20	-	0,74	3,90	3,54
13	-	0,71	3,45	3,78	0,70	3,30	-	0,68	3,02	2,89
14	-	0,66	2,74	2,90	0,65	2,60	-	0,64	2,46	2,55
15	-	0,63	2,32	2,44	0,62	2,18	-	0,62	2,18	2,49
16	-	0,60	1,90	2,37	0,60	1,90	-	0,60	1,90	3,11
17	-	0,58	1,64	2,26	0,57	1,51	10,83	0,60	1,90	2,84

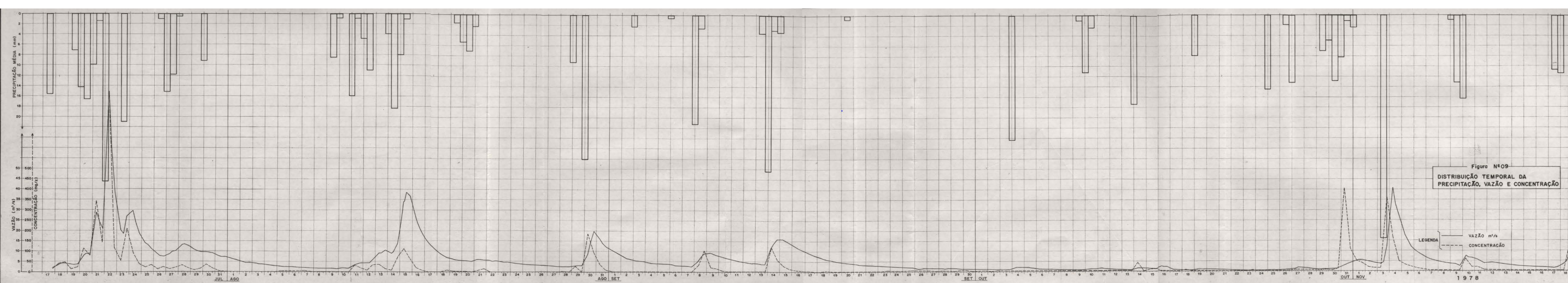


Figura Nº09
DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DA
PRECIPITAÇÃO, VAZÃO E CONCENTRAÇÃO

LEGENDA
 — VAZÃO m³/s
 - - - CONCENTRAÇÃO

3.2.4. Seleção dos eventos para a análise do Sedimentograma Unitário

A Tabela Nº 04 e a Figura Nº 09 mostram as alturas pluviométricas médias sobre a área da bacia, de 12 em 12 horas, valores de vazão verificados às 7 h, 12 h e 19 horas e concentração de sedimentos em suspensão verificados às 7 h e 19 horas, durante o período compreendido entre 17 de julho e 17 de novembro de 1978, na Bacia do Rio Forquetinha.

A análise daquela figura mostra a predominante ocorrência de sedimentos em suspensão, em períodos de cheia, e a quase nulidade deles em períodos normais, o que sugere tratar-se de deplúvio.

Em vista disso, selecionaram-se períodos adequados para o estudo do sedimentograma, ou seja, períodos em que se verificaram a caracterização de cheia, pelas elevações do nível d'água e concentração de sedimentos em suspensão, resultantes de chuvas com distribuição tanto quanto possível uniforme sobre a bacia.

Apresentaram condições favoráveis à análise, os eventos ocorridos nos seguintes períodos:

21-22-23/Julho/78;

23-24-25/Julho/78;

14-15-16/Agosto/78;

29-30-31/Agosto/78;

07-08-09/Setembro/78;

13-14-15-16/Setembro/78.

Face à ordem de grandeza da bacia hidrográfica do Rio Forquetinha (310 Km²) e à forma dos hidrogramas observados (tempo de base), adotou-se um período unitário de 6 horas para o presente estudo, de acordo com o proposto por SHERMAN (1942), na análise do Hidrograma Unitário.

Valores instantâneos de vazão e concentração verificados em seus respectivos tempos de medição foram plotados em relação ao tempo. Com base nesses pontos e na posição relativa ao início da chuva, traçaram-se as curvas de vazão e concentração para todos os eventos selecionados. As Figuras Nº 10, 11, 16, 17, 18 e 19 mostram esses gráficos em escalas adequadas de modo a facilitar as análises.

As precipitações médias sobre a bacia, determinadas pelo método de Thiessen, referem-se a chuvas tombadas em 12 horas. Porém, em face ao período unitário de 6 horas, adotado, houve necessidade de distribuir aquelas chuvas acumuladas em dois intervalos de 6 horas.

Essa distribuição não obedeceu a nenhuma regra pré-estabelecida. Entretanto, em cada caso, efetuou-se uma análise da forma do hidrograma, da posição relativa do início da elevação, do pico, do fim da curva de recessão e do tempo de base do hidrograma. Supõe-se que as precipitações distribuídas dessa maneira coincidem com as precipitações efetivas,

quanto ao seu início.

A obtenção dos Sedimentogramas e Hidrogramas Unitários foi realizada de duas formas distintas, conforme a ocorrência da chuva: chuvas isoladas e chuvas complexas.

3.2.5. Obtenção do Sedimentograma Unitário

O Sedimentograma Unitário para a Bacia do Rio Forquetha é determinado a partir do estudo de 6 períodos de cheia, selecionados com esse objetivo. Cada período forneceu um Sedimentograma Unitário que contribuiu para a escolha final.

Face a semelhança entre os cálculos do Sedimentograma Unitário e os do Hidrograma Unitário, eles foram simultaneamente determinados.

O Sedimentograma Unitário é desenvolvido em unidade padrão de 1 tonelada para precipitação de duração 6 horas, uniformemente distribuída sobre a bacia, ou seja, SU (1,6).

O Hidrograma Unitário, desenvolvido em paralelo, refere-se a chuvas de 10 mm, uniformemente distribuídas sobre a bacia, com duração de 6 horas, isto é, HU (10,6).

Os cálculos são efetuados basicamente de duas formas distintas, conforme o tipo de ocorrência da precipitação:

- chuvas isoladas; e
- chuvas complexas.

3.2.5.1. Sedimentograma Unitário a partir de chuvas isoladas

Entre os eventos selecionados para a análise do Sedimentograma Unitário, dois foram classificados como provenientes de chuvas isoladas com duração de 6 horas. São os eventos ocorridos nos seguintes períodos:

21-22-23/julho/78;

23-24-25/julho/78.

O processo de obtenção do Sedimentograma Unitário, para o caso de chuvas isoladas, consiste na simples aplicação dos princípios anteriormente citados (item 3.2.2.).

Os seguintes passos foram seguidos:

1º) cálculo do volume de chuva precipitada sobre a bacia (VPR);

2º) separação gráfica do volume de sedimentos produzidos pelo escoamento superficial, ou seja, do deplúvio;

3º) cálculo do volume de sedimentos produzidos pelo escoamento superficial (VSD);

4º) cálculo do sedimento efetivo mobilizado (SE);

5º) redução do sedimentograma de deplúvio ao sedimentograma unitário.

1º) Cálculo do volume precipitado sobre a bacia (VPR)

As alturas pluviométricas médias são obtidas pela média ponderada das alturas registradas nos 4 pluviômetros, sendo

as respectivas áreas de influência consideradas conforme o critério de Thiessen.

As precipitações médias obtidas são correspondentes a chuvas tombadas em 12 horas, sobre a área da bacia. Entretanto, para efeito de cálculo do Sedimentograma Unitário, as alturas pluviométricas médias foram distribuídas em intervalos de 6 horas, como foi visto no Ítem 3.2.4.

As precipitações médias correspondentes aos eventos de chuvas isoladas estão graficadas nas Figuras nº 10 e 11. E os volumes correspondentes a essas precipitações constam na Tabela nº 12.

2º) Separação dos sedimentos produzidos pelo escoamento superficial

Como foi observado no Ítem 3.2.2, o sedimentograma de cheia é formado por dois componentes, dos quais o deplúvio corresponde à parte do sedimentograma, provocado pelo escoamento superficial sobre a bacia contribuinte. Portanto, há necessidade de distinção daqueles componentes, para a consideração do deplúvio no estudo do Sedimentograma Unitário.

Uma grande dificuldade que existe entre os hidrólogos que abordam o problema de hidrogramas de cheia, refere-se à separação das contribuições do escoamento superficial e do escoamento subterrâneo nos hidrogramas de cheia. Maior é a dificuldade nessa abordagem quando se trata de sedimentos.

Existem diversos procedimentos utilizados na separação

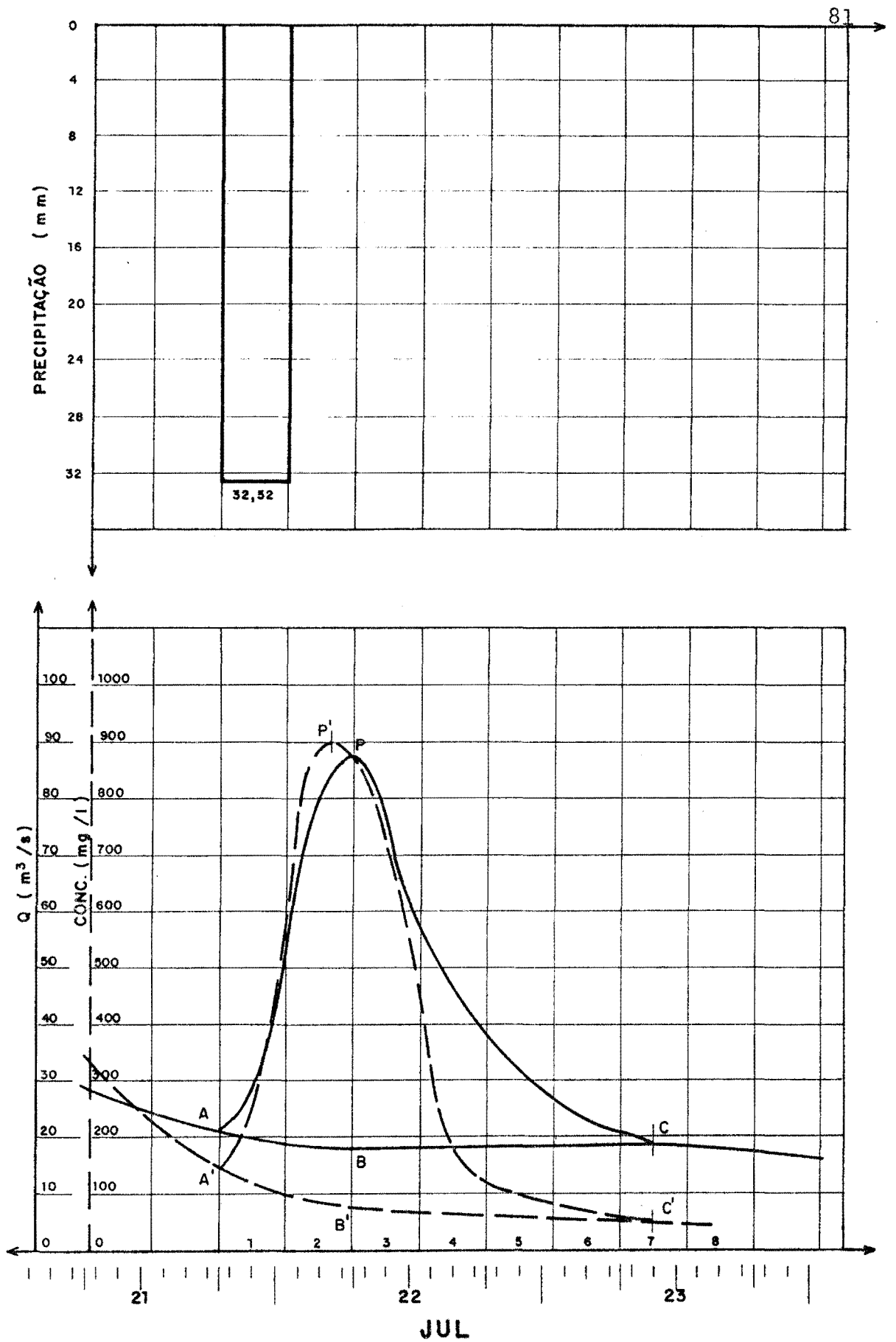


Figura Nº 10 .-

HIDROGRAMA E SEDIMENTOGRAMA

CHUVA ISOLADA; 21, 22 E 23 DE JULHO/1978

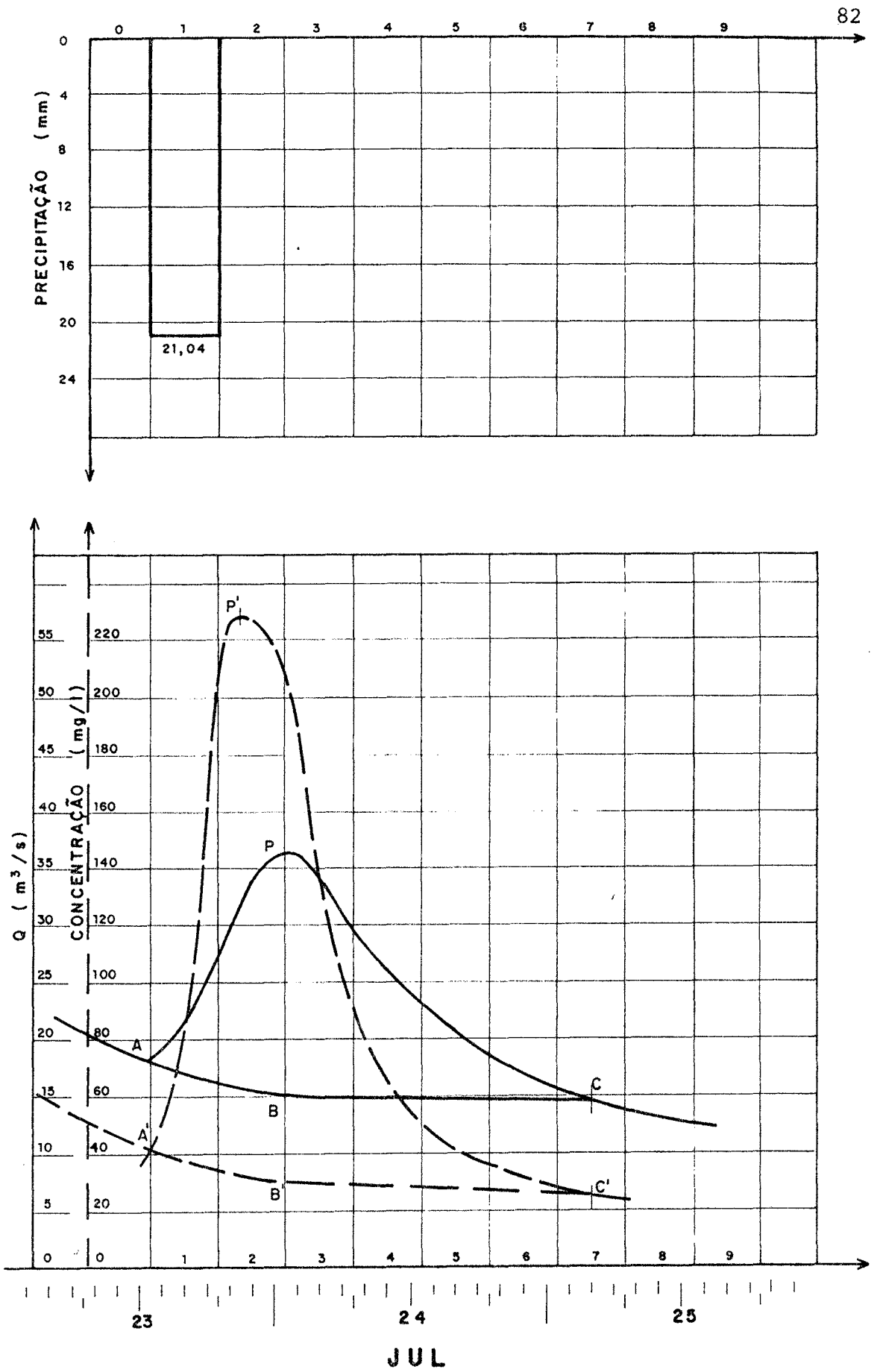


Figura Nº 11 .-

HIDROGRAMA e SEDIMENTOGRAMA
 CHUVA ISOLADA, 23, 24, e 25 de JULIO/ 1978

do escoamento superficial, quando se trata de hidrogramas (LINSLEY, KOHLER & PAULHUS, 1949). Porém nenhum deles é passível de verificação direta quanto a sua adequação.

Neste trabalho, fez-se, inicialmente, a separação dos componentes do hidrograma, o qual serviu de base para destacar o deplúvio no sedimentograma.

Basicamente, o procedimento objetivou a determinação de três pontos fundamentais: início da elevação do hidrograma e sedimentograma (A, A'), início da contribuição subterrânea (B, B') e fim da contribuição superficial (C, C'). Esses pontos são, então, interligados por curvas para separar os componentes (ver Figuras Nº 10 e 11).

O procedimento pode ser ordenado como segue:

a) o ponto A do hidrograma corresponde ao início da contribuição superficial e coincide com o início da chuva efetiva;

b) nesse mesmo instante, tem início a contribuição do deplúvio, pela elevação do sedimentograma, determinando-se o ponto A';

c) o ponto B do hidrograma, correspondente ao início da contribuição do lençol subterrâneo, situa-se na intersecção da vertical baixada do pico do hidrograma com o prolongamento da curva de depleção, anterior à chuva considerada;

d) o ponto B' do sedimentograma situa-se na mesma vertical do ponto B, na intersecção com o prolongamento da curva

de depleção do sedimentograma;

e) o ponto C do hidrograma corresponde ao fim da contribuição do escoamento superficial e ao início da curva de depleção; como a curva de depleção segue aproximadamente uma lei exponencial (LINSLEY, KOHLER & PAULHUS, 1949), a relação entre as descargas (q_n/q_{n-1}) será uma constante; esse procedimento determinou o ponto C, cujo cálculo consta na Tabela Nº 05;

f) no sedimentograma, o ponto C', relativo ao final da ocorrência do deplúvio, é considerado no mesmo instante da ocorrência do ponto C no hidrograma;

g) nos sedimentogramas, os pontos B' e C', e os pontos B e C dos hidrogramas de chuvas isoladas foram ligados por uma reta.

Em caso de hidrograma de chuvas complexas, em vista da forma das curvas de recessão e depleção apresentadas, adotou-se uma curva em forma de "S", para ligar os pontos B e C. Essa forma de separação foi a que permitiu melhores resultados para os Sedimentogramas Unitários, entre as diferentes formas testadas.

3º) Cálculo do volume de deplúvio

A quantidade de deplúvio produzido em cada evento é dada em peso de sedimentos em suspensão, provenientes do escoamento superficial sobre a bacia hidrográfica.

Para a obtenção da quantidade de deplúvio em toneladas,

Tabela Nº 05. Determinação do ponto "C" dos Hidrogramas

1978											
23/JUL	hora (h)	02	04	06	08	10	12	14	16	18	20
	Qn (m ³ /s)	25,0	23,0	21,2	20,0	18,8	18,5	18,2	17,9	17,6	17,3
	Qn/Qn-1		0,92	0,92	0,94	0,94	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
24-25/JUL	hora (h)	20	22	24	02	04	06	08	10	12	14
	Qn (m ³ /s)	18,0	16,8	15,9	15,2	14,6	14,2	13,8	13,4	13,0	12,6
	Qn/Qn-1		0,93	0,95	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
16/AGO	hora (h)	08	10	12	14	16	18	20	22	24	02
	Qn (m ³ /s)	25,3	24,0	22,7	21,6	20,5	19,5	18,6	17,8	17,0	16,3
	Qn/Qn-1		0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,96	0,96	0,96
31/AGO	hora (h)	12	14	16	18	20	22	24	02	04	06
	Qn (m ³ /s)	14,10	13,50	13,00	12,50	12,15	11,75	11,35	11,00	10,70	10,40
	Qn/Qn-1		0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
09-10/SET	hora (h)	22	24	02	04	06	08	10	12	14	16
	Qn (m ³ /s)	7,90	7,75	7,60	7,48	7,36	7,25	7,15	7,05	6,98	6,89
	Qn/Qn-1		0,98	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
16/SET	hora (h)	06	08	10	12	14	16	18	20	22	24
	Qn (m ³ /s)	12,50	12,18	11,88	11,57	11,28	11,00	10,77	10,52	10,28	10,04
	Qn/Qn-1		0,97	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
04-05/SET	hora (h)	22	24	02	04	06	08	10	12	14	16
	Qn (m ³ /s)	23,85	22,25	20,80	19,40	18,00	17,00	16,00	15,00	14,10	13,20
	Qn/Qn-1		0,93	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94

fez-se o somatório das descargas de deplúvio, consideradas como médias do intervalo de tempo unitário adotado e multiplicando-se adequadamente por esse intervalo:

$$VSD = \frac{2}{24} (\Sigma SD)$$

onde: VSD = é a quantidade de deplúvio produzido, em toneladas

SD = são os valores instantâneos de descarga de deplúvio, em l/dia, considerados como médias dos intervalos de tempo adotado: 2 horas.

Os dados para o cálculo das descargas de deplúvio são obtidos das Figuras Nº 10 e 11. Os cálculos estão apresentados nas Tabelas Nº 06 e 07 e são desenvolvidos em intervalos de tempo de 2 horas, onde:

QT = vazão total, obtida do hidrograma, em m³/s;

QB = contribuição subterrânea do hidrograma, em m³/s;

QD = escoamento superficial em m³/s; QD = QT - QB

CT = concentração total de sedimentos em suspensão em mg/l;

CB = concentração de sedimentos em suspensão que não constituem o deplúvio, em mg/l;

ST = descarga total de sedimentos em suspensão, em t/d, ST = QT . CT . 0,0864;

SB = descarga de sedimentos em suspensão que não

constituem o deplúvio, em t/d;

$$SB = QB \cdot CB \cdot 0,0864;$$

SD = descarga de deplúvio, em t/d;

$$SD = ST - SB$$

0,0864 = fator de transformação de unidades.

Simultaneamente, é calculada a descarga de escoamento superficial (QD) e determinado o volume de água escoado superficialmente:

$$VQD = 7200 \cdot \Sigma QD$$

onde: VQD = volume de água escoado superficialmente, em m³;

QD = valores instantâneos de descarga de água escoada superficialmente, em cada intervalo de 2 horas, em m³/s;

7200 = fator de transformação.

As quantidades de deplúvio produzido em cada evento estão relacionadas na Tabela Nº 12, assim como os volumes de água escoada superficialmente e os das respectivas precipitações.

4º) Cálculo do Sedimento Efetivo Mobilizado

Sedimento Efetivo Mobilizado (SE) é um índice que representa a média de deplúvio produzido por unidade de área da bacia hidrográfica.

A determinação do SE é feita, para cada evento, pela razão entre a quantidade de deplúvio produzido e a área da ba

cia. Resulta, daí, o Sedimento Efetivo Mobilizado, em toneladas por quilômetros quadrados (t/km^2);

$$SE = \frac{VSD}{A}$$

onde: SE = Sedimento Efetivo Mobilizado, em t/Km^2 ;

VSD = deplúvio produzido no evento, em t;

A = área da bacia hidrográfica, em Km^2 ;

Analogamente, a Precipitação Efetiva (QE) é determinada pela razão entre o volume total de água escoada superficialmente e a área da bacia:

$$QE = \frac{VSD}{A} \cdot 10^{-3}$$

onde: QE = Precipitação Efetiva, em mm;

VQD = volume de água escoada superficialmente, em m^3 ;

A = área da bacia hidrográfica, em Km^2 ;

10^{-3} = fator de transformação de unidades.

Os valores de SE e QE, para cada evento de chuvas isoladas e chuvas complexas, estão relacionados na Tabela nº 12.

5º) Redução do sedimentograma de deplúvio em Sedimento grama Unitário

O Sedimento Unitário SU (1,6), para cada evento, é obtido, dividindo-se as ordenadas do sedimentograma de deplúvio pelo Sedimento Efetivo Mobilizado do respectivo evento:

$$SU = \frac{SD}{SE}$$

onde: SU = ordenadas do SU (1,6), em Km²/dia;
 SD = ordenadas do sedimentograma de deplúvio, em t/
 dia;
 SE = Sedimento Efetivo Mobilizado, em t/Km².

Simultaneamente, é determinado o Hidrograma Unitário HU (10,6), pela relação:

$$QU = \frac{QD \cdot 10}{QE}$$

onde: QU = ordenadas do HU (10,6), em m³/s;
 QD = ordenadas do hidrograma de escoamento superficial, em m³/s;
 QE = Precipitação Efetiva, em mm;
 10 = unidade padrão do Hidrograma Unitário, 10 mm;

Os valores das ordenadas dos Sedimentogramas Unitários SU (1,6) e dos Hidrogramas Unitários QU (10,6) são calculados nas Tabelas Nº 06 e 07.

Os Sedimentogramas Unitários, obtidos para chuvas isoladas, estão graficadas nas Figuras Nº 12 e 13 e os Hidrogramas Unitários nas Figuras Nº 14 e 15.

3.2.5.2. Sedimentograma Unitário a partir de chuvas complexas

Devido à exigüidade do período em que foram feitas as observações no campo, não foi possível a obtenção de uma quan

Tabela Nº 6. Cálculo do HU (10,6) e SU (1,6) - Chuva isolada (21-22-23/JUL/1978)

TEMPO (dia/hora)	QT (m ³ /s)	QB (m ³ /s)	QD (m ³ /s)	CT (mg/l)	CB (mg/l)	ST (t/d)	SB (t/d)	SD (t/d)	QU (m ³ /s)	SU (Km ² /d)
21/										
20	22,0	21,0	1,0	165,0	137,0	313,63	248,57	65,06	0,82	6,85
22	29,0	20,0	9,0	258,0	120,0	646,44	207,36	439,08	7,41	46,22
24	43,5	19,2	24,3	450,0	105,0	1691,28	174,18	1517,10	20,02	159,68
22/										
02	64,5	18,9	45,6	760,0	92,0	4235,33	150,23	4085,10	37,56	430,01
04	80,5	18,3	62,2	890,0	84,0	6190,13	132,81	6057,32	51,24	637,61
06	86,5	18,0	68,5	890,0	75,0	6651,50	116,64	6534,86	56,43	687,88
08	85,5	18,0	67,5	840,0	70,0	6205,25	108,86	6096,39	55,60	641,73
10	76,0	18,0	58,0	715,0	69,0	4694,98	107,31	4587,67	47,78	482,91
12	61,0	18,0	43,0	560,0	68,0	2951,42	105,75	2845,67	35,42	299,54
14	54,0	18,1	35,9	330,0	67,0	1539,65	104,78	1434,87	29,57	151,04
16	47,0	18,1	28,9	180,0	66,0	730,94	103,21	627,73	23,81	66,08
18	41,0	18,1	22,9	135,0	64,0	478,22	100,09	378,13	18,86	39,80
20	36,0	18,2	17,8	110,0	62,0	342,14	97,49	244,65	14,66	25,75
22	31,5	18,2	13,3	95,0	60,0	258,55	94,35	164,20	10,96	14,98
24	28,0	18,3	9,7	82,0	58,0	198,37	91,70	106,67	7,99	11,23
23/										
02	25,0	18,4	6,6	75,0	56,0	162,00	89,03	72,97	5,44	7,68
04	23,0	18,5	4,5	68,0	54,0	135,13	86,31	48,82	3,71	5,14
06	21,2	18,6	2,6	61,0	52,0	111,73	83,57	28,16	2,14	2,96
08	20,0	18,7	1,3	56,0	51,0	96,77	82,40	14,37	1,07	1,51
10	18,8	18,8	0	50,0	50,0	81,22	81,22	0	0	0
Σ			522,60					35348,82	430,48	3718,62

Tabela Nº 7. Cálculo do HU (10,6) e SU (1,6) - Chuva isolada (23-24-25/JUL/1978)

TEMPO (dia/hora)	QT (m ³ /s)	QB (m ³ /s)	QD (m ³ /s)	CT (mg/l)	CB (mg/l)	ST (t/d)	SB (t/d)	SD (t/d)	QU (m ³ /s)	SU (Km ² /d)
23/										
14	19,0	17,8	1,20	48,0	40,0	78,80	61,52	17,28	2,84	16,62
16	21,4	17,2	4,20	82,0	38,0	151,61	56,47	95,14	9,95	91,48
18	24,7	16,6	8,10	158,0	36,0	337,18	51,63	285,55	19,19	274,57
20	29,3	16,0	13,30	226,0	34,0	572,12	47,00	525,12	31,52	504,92
22	33,6	15,6	18,00	228,0	32,0	661,89	43,13	618,76	42,65	594,96
24	36,0	15,2	20,80	221,0	31,0	687,40	40,71	646,69	49,29	621,82
24/										
02	36,2	15,0	21,80	190,0	30,5	594,26	39,53	555,00	51,66	533,65
04	34,0	15,0	19,00	140,0	30,0	411,26	38,88	372,38	45,02	358,06
06	31,0	14,9	16,10	104,0	29,5	278,55	37,98	240,57	38,15	231,32
08	28,3	14,9	13,40	81,0	29,0	198,05	37,33	160,72	31,75	154,54
10	26,2	14,9	11,30	65,0	29,0	147,14	37,33	109,81	26,78	105,59
12	24,0	14,8	9,20	55,0	28,5	114,05	36,44	77,61	21,80	74,63
14	22,4	14,8	7,60	48,0	28,0	92,90	35,80	57,10	18,01	54,90
16	20,7	14,8	5,90	42,0	28,0	75,12	35,80	39,32	13,98	37,81
18	19,3	14,8	4,50	38,0	27,5	63,37	35,16	28,21	10,66	27,13
20	18,0	14,7	3,30	34,0	27,0	52,88	34,29	18,59	7,82	17,88
22	16,8	14,7	2,10	32,0	27,0	46,45	34,29	12,16	4,98	11,69
24	15,9	14,7	1,20	29,0	26,5	39,84	33,66	6,18	2,84	5,94
25/										
02	15,2	14,6	0,60	27,0	26,5	35,46	33,43	2,03	1,42	1,95
04	14,6	14,6	0	26,0	26,0	32,80	32,80	0	0	0
Σ			181,60					3868,22	430,33	3719,44

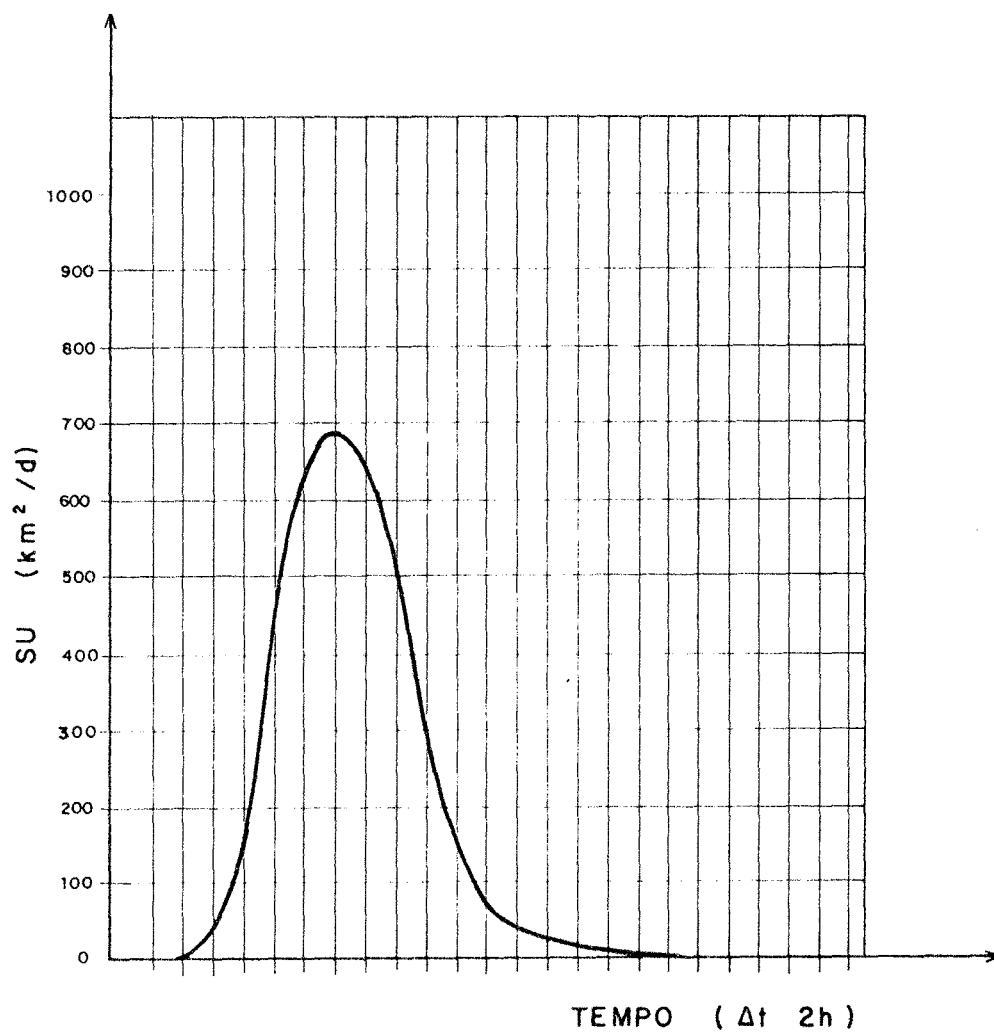


Figura N^o 12 .-

SU (1,6)

CHUVA ISOLADA (21 · 22 · 23 / JUL / 78)

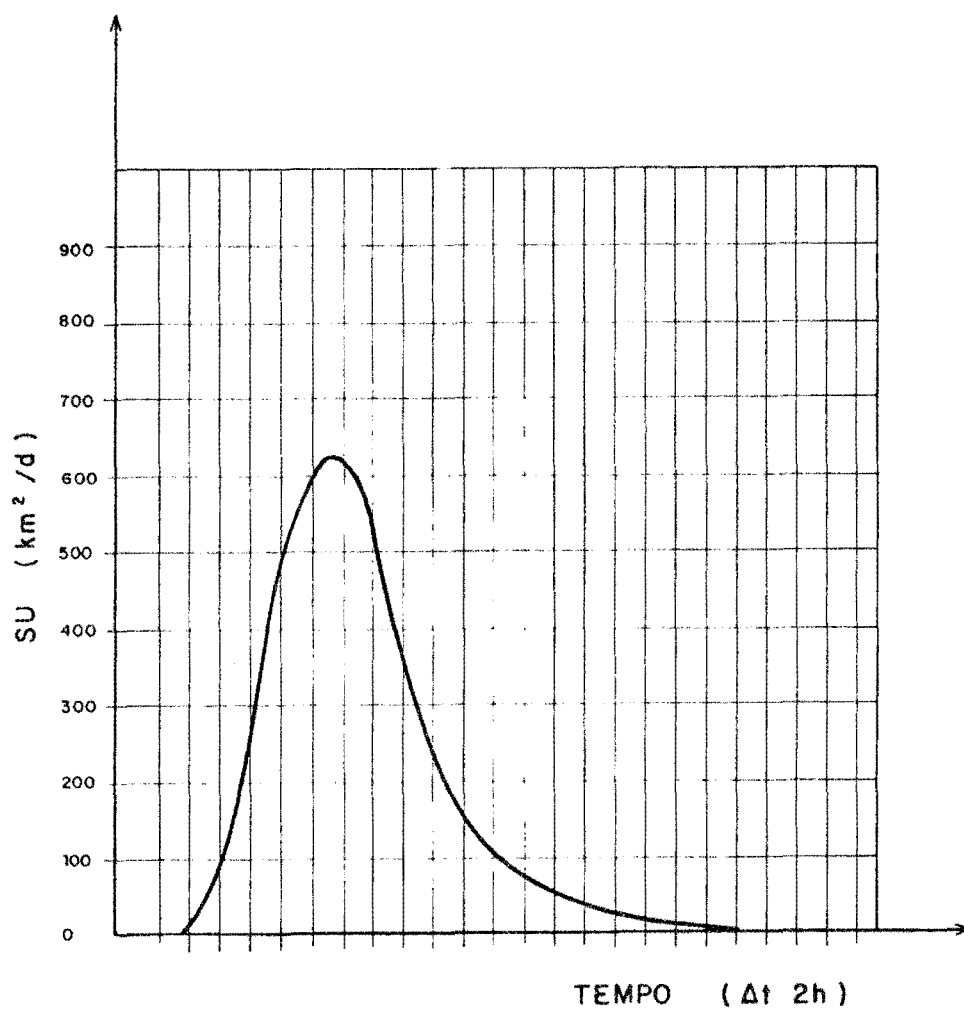


Figura N° 13.-

SU (1,6)

CHUVA ISOLADA (23 · 24 · 25 / JUL / 78)

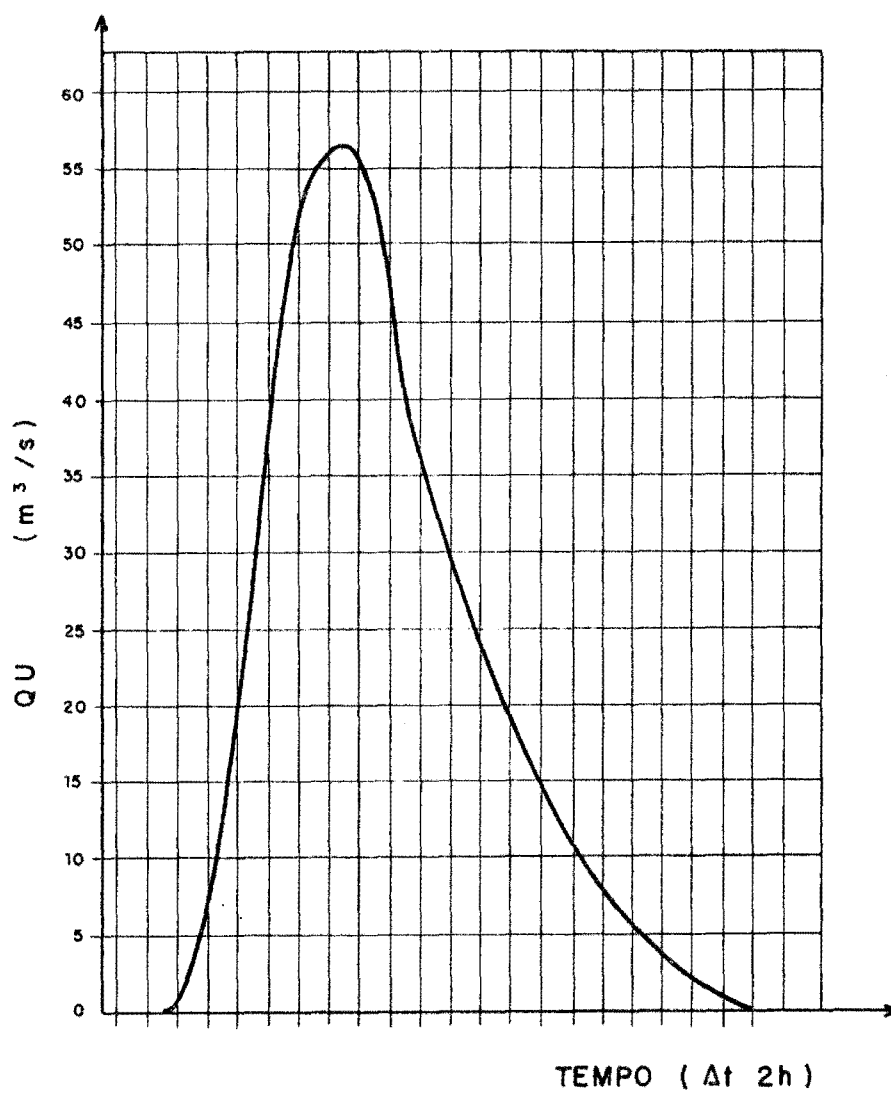


Figura Nº 14 .-

HU (10, 6)

CHUVA ISOLADA (21 · 22 · 23 / JUL / 78)

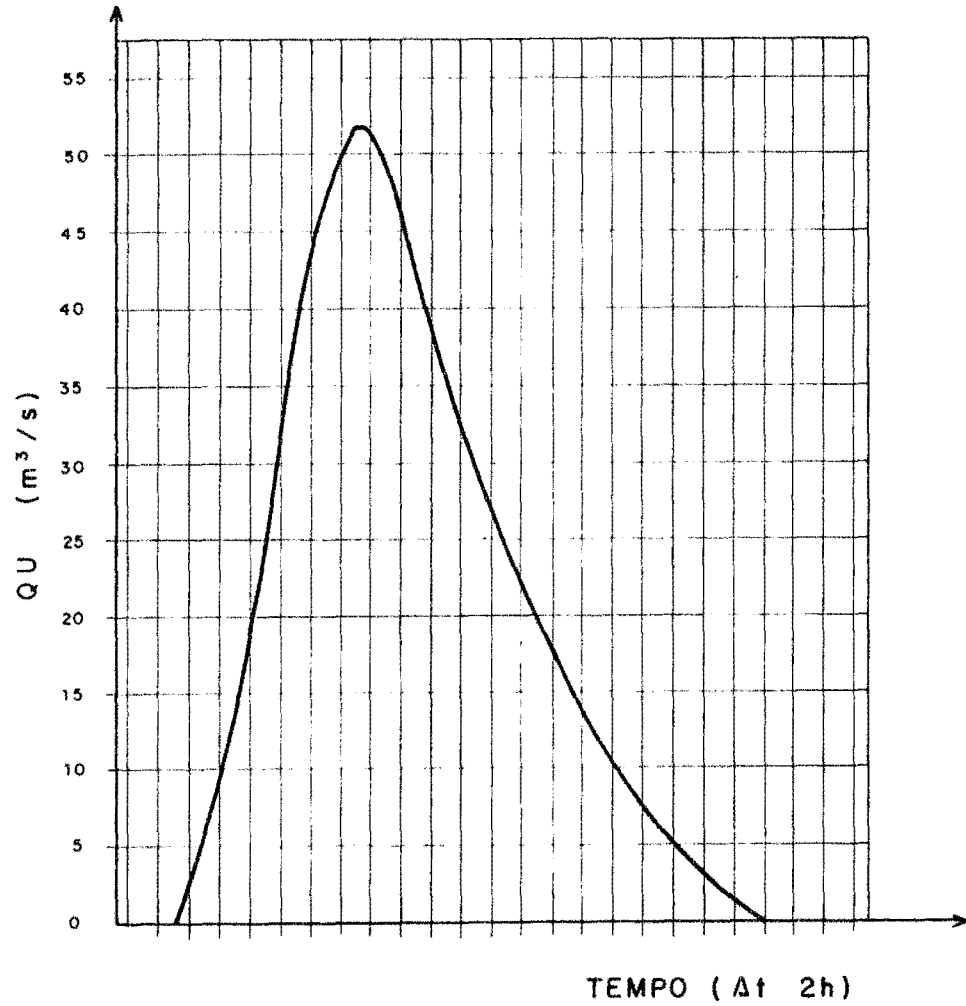


Figura N° 15.-

HU (10,6)

CHUVA ISOLADA (23·24·25 / JUL / 78)

tidade adequada de fluviogramas, provenientes de chuvas isoladas, para a obtenção do Sedimentograma Unitário. Dessa forma, o estudo foi também efetuado sobre fluviogramas de chuvas complexas, resultante de precipitações sucessivas.

Entre os eventos selecionados para a análise do Sedimentograma Unitário, quatro são provenientes de chuvas complexas:

-14-15-16/agosto/78

-29-30-31/agosto/78

-07-08-09/setembro/78

-13-14-15-16/setembro/78

O terceiro princípio fundamental do método do Sedimentograma Unitário (Ítem 3.2.2.), definido com base no hidrograma de Sherman, possibilita a interpretação de um sedimentograma complexo como resultante da superposição de sedimentogramas isolados. Os sedimentogramas isolados correspondem às respectivas precipitações sucessivas do evento complexo e admitem todos eles, um mesmo Sedimentograma Unitário.

O método de cálculo adotado é uma resolução por aproximações sucessivas, pelas quais se chega ao Sedimentograma Unitário através de uma série de tentativas, racionalmente organizadas e que permitem uma rápida convergência aos resultados finais.

O procedimento de cálculo pode ser descrito como segue: Um Sedimentograma Unitário, escolhido *a priori*, é aplicado

às precipitações verificadas, com exceção da maior. Subtraindo-se o sedimentograma resultante do sedimentograma total de deplúvio, obtêm-se as descargas de deplúvio, que se presumem originadas por efeito da precipitação omitida. Reduzindo-se esses valores a um volume unitário, obtêm-se o Sedimentograma Unitário, que é tanto mais semelhante ao inicialmente adotado, quanto mais corretos são os valores arbitrados.

As diversas etapas do processo podem ser ordenadas como segue:

- 1º) cálculo do volume de chuva precipitada sobre a bacia (VPR);
- 2º) separação gráfica dos componentes do sedimentograma, ou seja, a identificação do deplúvio e o cálculo do seu volume (VSD);
- 3º) cálculo do coeficiente médio de produção de deplúvio (\bar{K});
- 4º) adoção dos coeficientes de produção de sedimentos para cada precipitação;
- 5º) adoção do Sedimentograma Unitário, para o início dos cálculos;
- 6º) aplicação do Sedimentograma Unitário às precipitações verificadas, com exceção da maior;
- 7º) subtração do sedimentograma resultante do sedimentograma total de deplúvio;
- 8º) redução do sedimentograma resultante em termos de

Sedimentograma Unitário.

1º) Cálculo do volume precipitado sobre a bacia

Em cada período de chuvas complexas selecionado, as precipitações médias determinadas em intervalos de 12 horas, foram distribuídas em intervalos de 6 horas, conforme foi visto no item 3.2.4.

Os volumes calculados de precipitação média sobre a bacia, em cada evento de chuvas complexas, estão relacionados na Tabela Nº 12.

2º) Separação dos componentes do sedimentograma e o cálculo do volume de deplúvio

Os procedimentos utilizados na separação dos componentes do sedimentograma e do hidrograma, em caso de chuvas complexas, são análogos aos procedimentos utilizados no caso de chuvas isoladas, e foram simultaneamente descritos no segundo item da secção 3.2.5.1.

As figuras Nº 16, 17, 18 e 19 mostram a separação dos componentes do sedimentograma e do hidrograma, para os eventos selecionados de chuvas complexas.

O cálculo de deplúvio produzido em cada evento, assim como o volume de água escoada superficialmente, seguem o mesmo procedimento delineado no terceiro item da secção 3.2.5.1., para o caso de chuvas isoladas.

As descargas de deplúvio foram determinadas em intervalos de tempo de 2 horas, conforme mostram as Tabelas Nº 08,

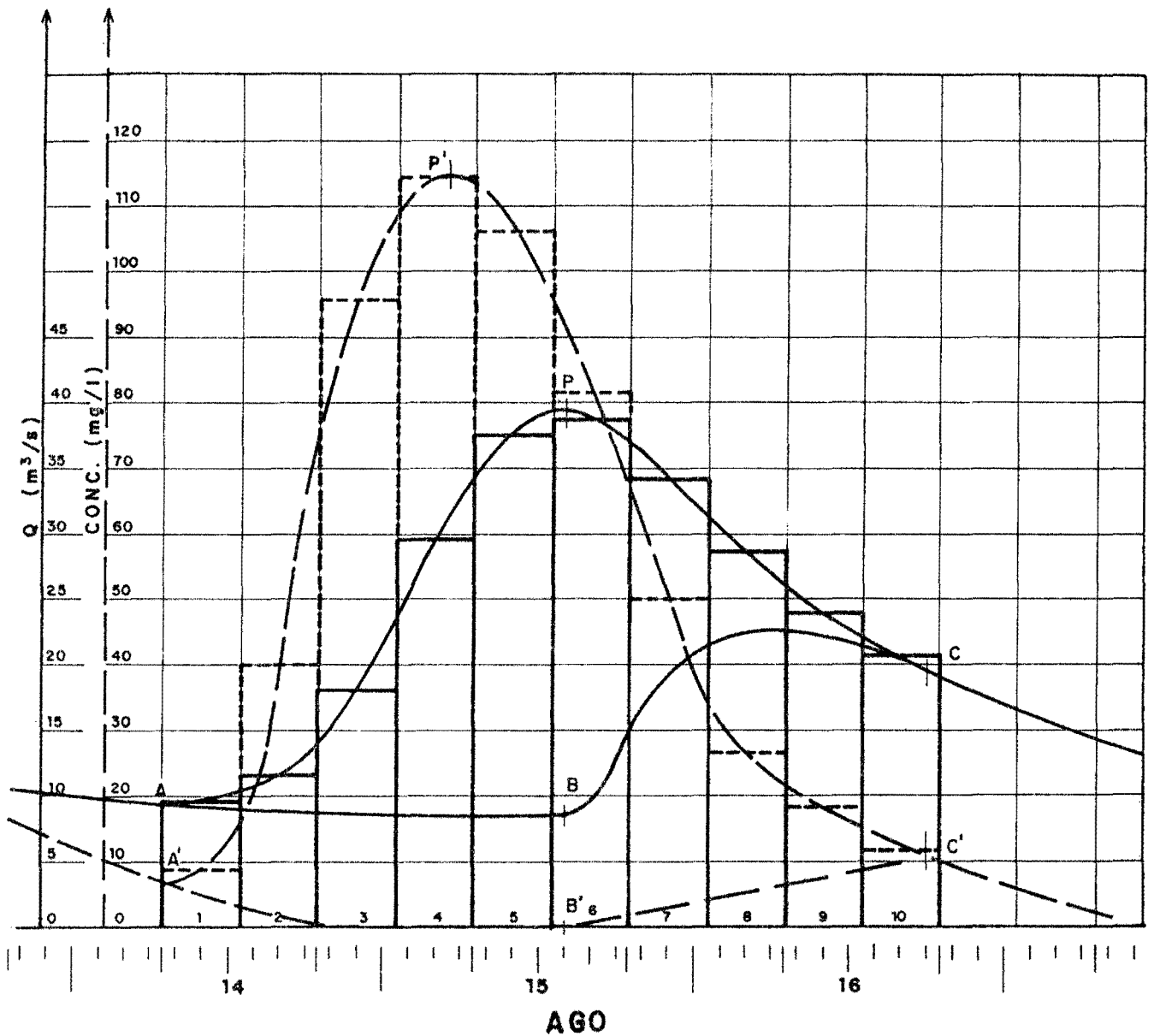
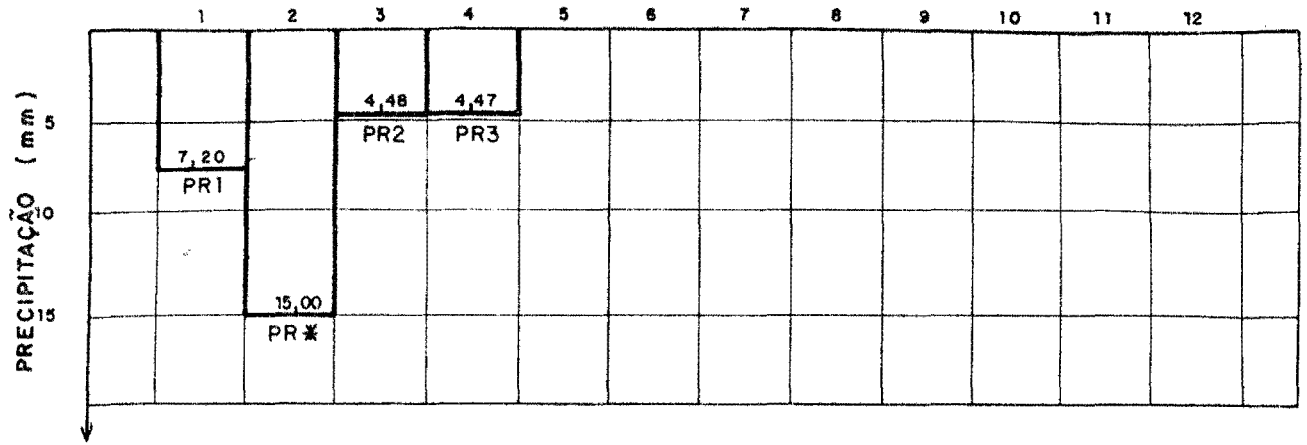


Figura Nº 16 .-

HIDROGRAMA E SEDIMENTOGRAMA
 CHUVAS COMPLEXAS, 14, 15 E 16 DE AGOSTO / 1978

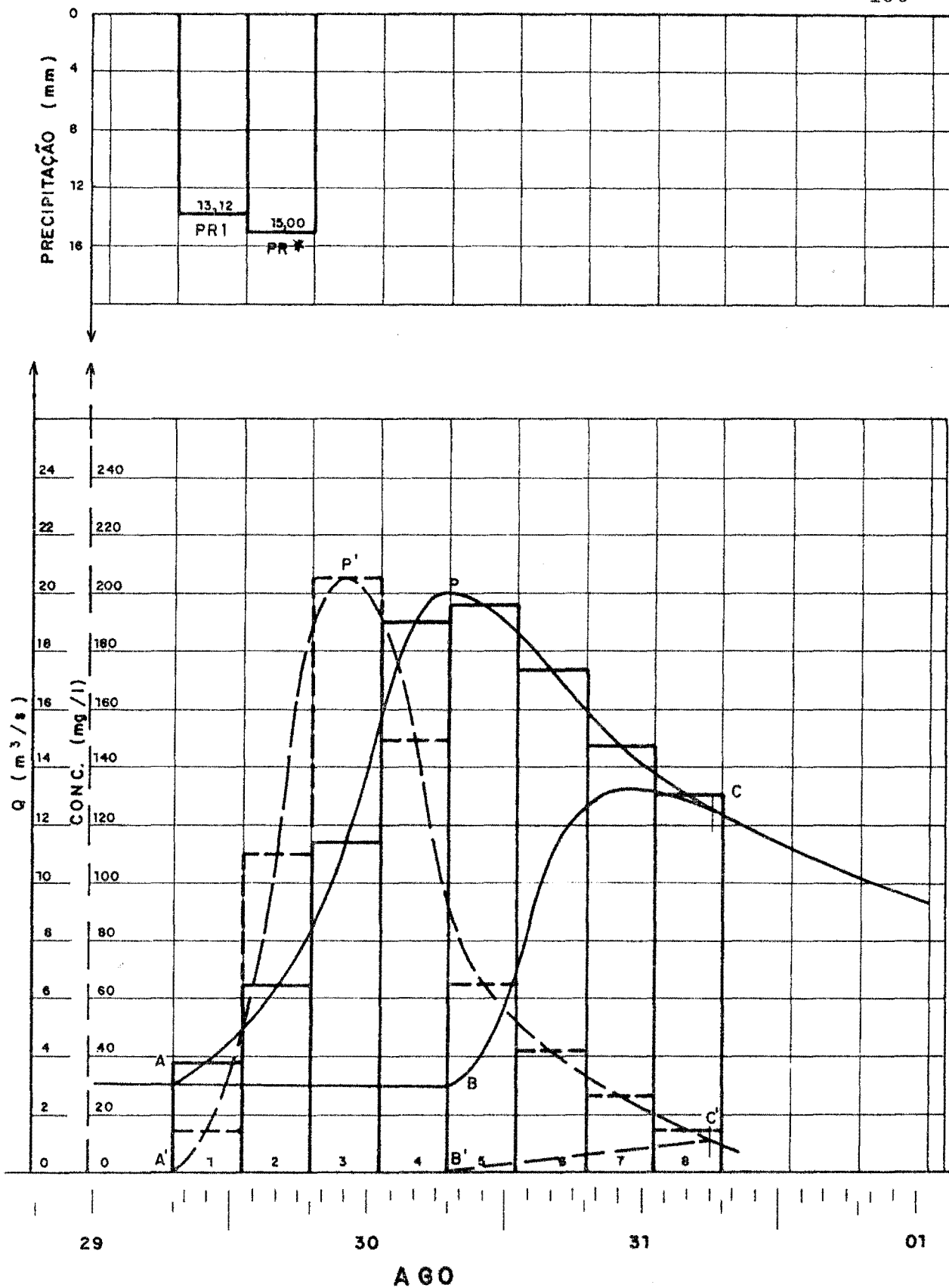
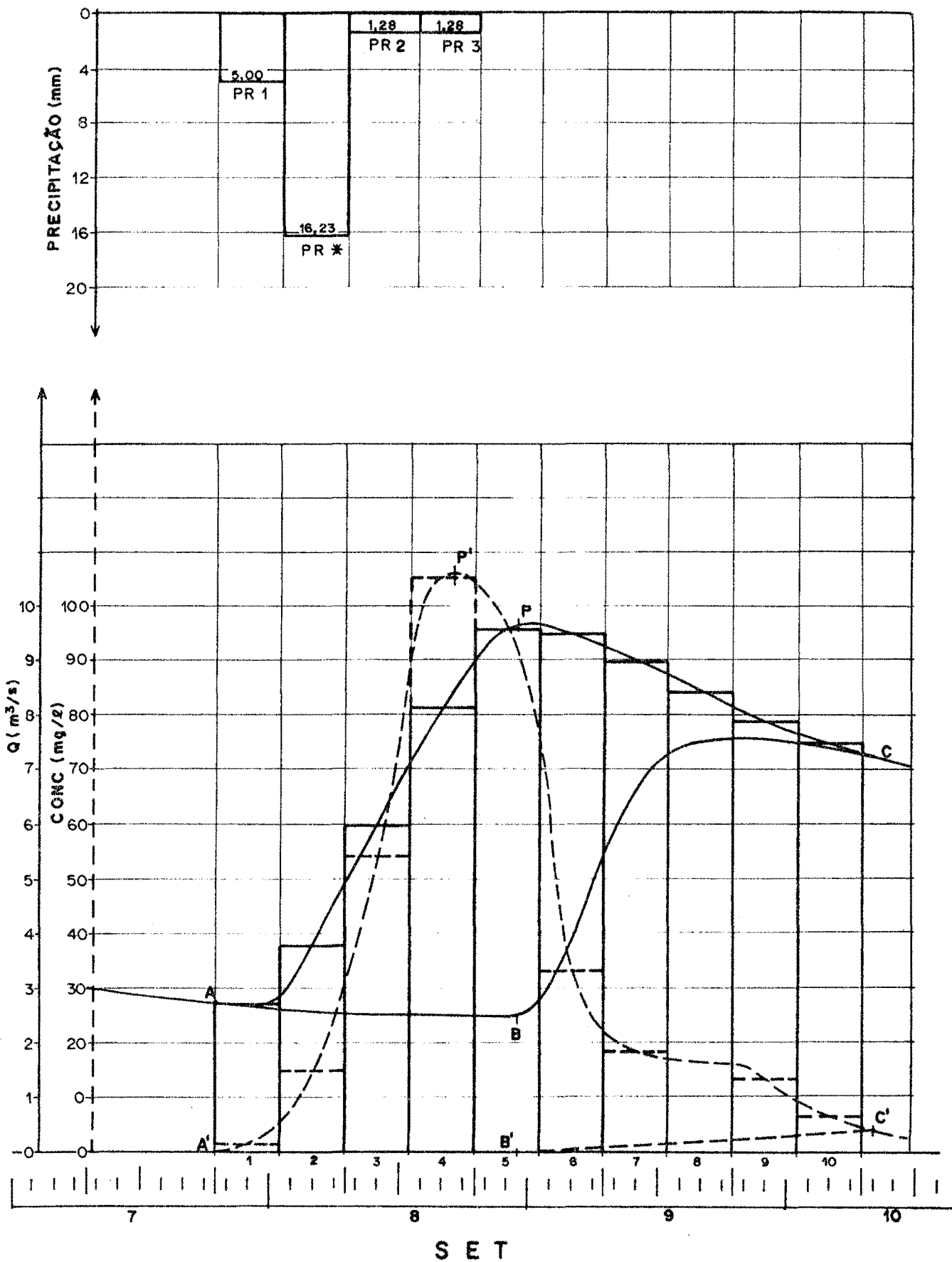


Figura Nº 17

HIDROGRAMA E SEDIMENTOGRAMA
 CHUVAS COMPLEXAS; 29, 30 E 31 DE AGOSTO/1978

HIDROGRAMA E SEDIMENTOGRAMA
CHUVAS COMPLEXAS (7-8-9/SET)



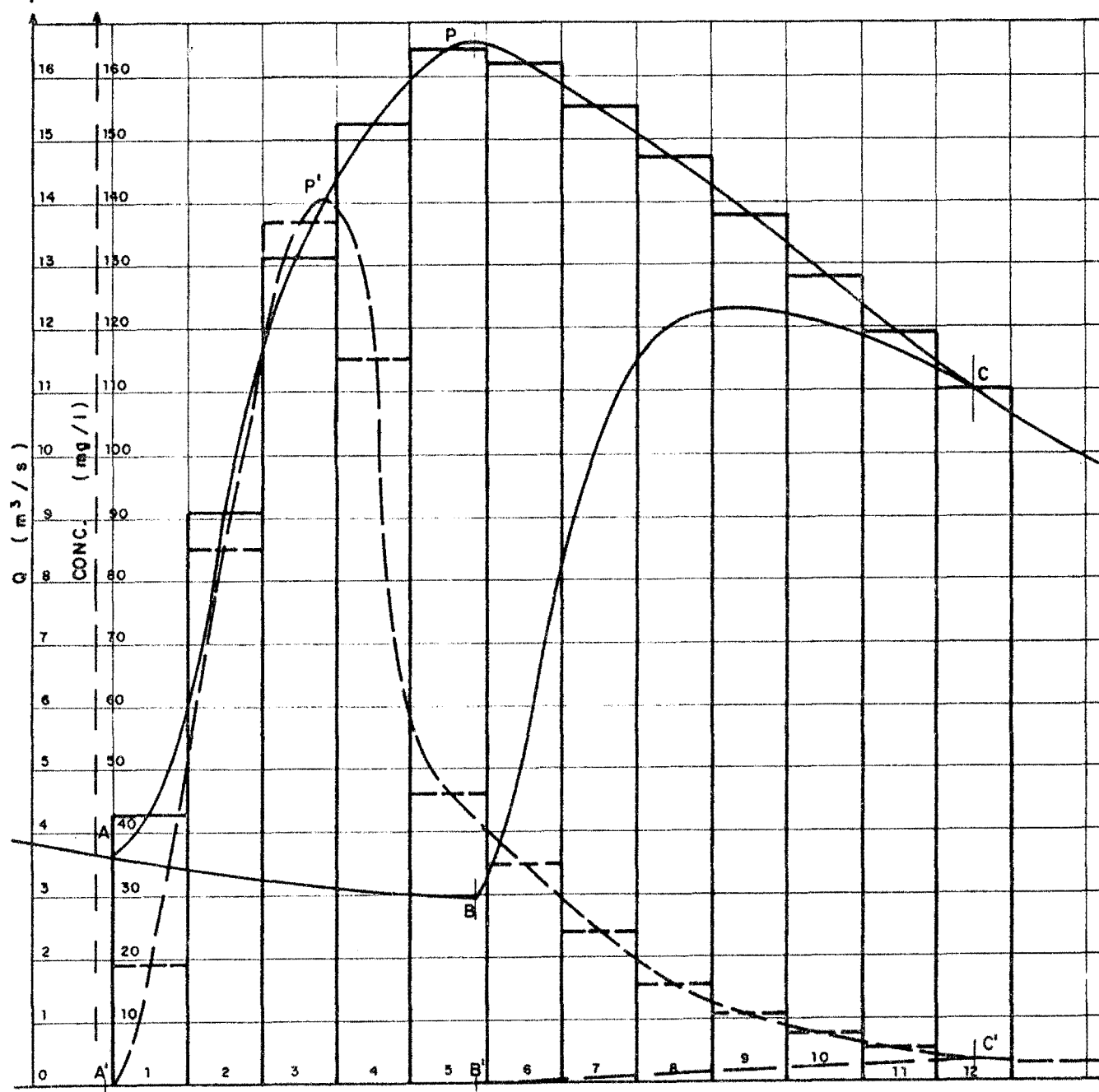
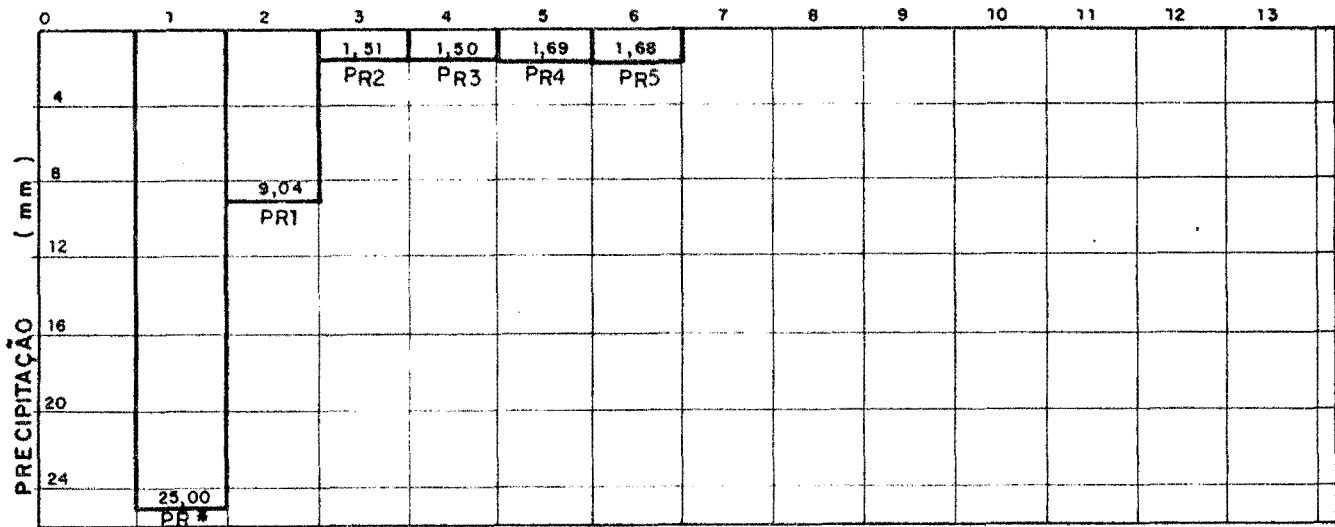


Figura Nº 19
 HIDROGRAMA E SEDIMENTOGAMA
 CHUVAS COMPLEXAS (13·14·15·16
 de SET / 1978)

09, 10 e 11. Os volumes de deplúvio e do escoamento superficial para os eventos de chuvas complexas estão relacionados na Tabela nº 12.

3º) Cálculo do coeficiente médio de produção de deplúvio (\bar{K})

Conhecidos os volumes de deplúvio produzido e das precipitações ocorridas nos eventos, determina-se o coeficiente médio de produção de deplúvio, pela razão entre os dois:

$$\bar{K} = \frac{VSD}{VPR}$$

onde:

\bar{K} = coeficiente médio de produção de deplúvio, em t/m^3 ;

VSD = volume de deplúvio produzido, em t;

VPR = volume de precipitação ocorrida no evento, em m^3 .

Analogamente, o coeficiente médio de escoamento superficial é determinado pela relação entre o volume escoado superficialmente e o volume precipitado:

$$\bar{C} = \frac{VQD}{VPR}$$

onde:

\bar{C} = coeficiente de escoamento superficial, adimensional;

VQD = volume de água escoada superficialmente, em m^3 ;

VPR = volume precipitado, em m^3 .

O valor dos coeficientes médios de produção de deplúvio (\bar{K}) e dos coeficientes médios de escoamento superficial (\bar{C}), para cada evento estudado, estão relacionados na Tabela

Tabela Nº 8. Cálculo de QD e SD - Chuvas complexas (14-15-16/AGO/1978)

TEMPO (dia/hora)	QT (m ³ /s)	QB (m ³ /s)	QD (m ³ /s)	CT (mg/l)	CB (mg/l)	ST (t/d)	SB (t/d)	SD (t/d)
14/								
08	9,40	9,30	0,10	7,00	6,50	5,69	5,22	0,47
10	9,60	9,20	0,40	9,00	5,00	7,46	3,97	3,49
12	10,20	9,00	1,20	12,30	4,00	10,84	3,11	7,73
14	10,80	8,90	1,90	20,00	3,00	18,66	2,31	16,35
16	11,50	8,80	2,70	39,00	2,00	38,75	1,52	37,23
18	13,00	8,70	4,30	65,00	1,00	63,01	0,75	72,26
20	15,20	8,65	6,55	84,00	0,30	110,32	0,22	110,10
22	18,20	8,65	9,55	95,50	0	150,17	0	150,17
24	21,70	8,60	13,10	105,00	0	196,86	0	196,86
15/								
02	25,80	8,60	17,20	111,00	0	247,43	0	247,43
04	29,60	8,60	21,00	114,00	0	291,55	0	291,55
06	33,00	8,55	24,45	114,50	0	326,46	0	326,46
08	35,60	8,55	27,05	112,00	0	344,49	0	344,49
10	37,50	8,50	29,00	106,20	0	344,09	0	344,09
12	39,00	8,50	30,50	99,00	0	333,59	0	333,59
14	39,40	8,50	30,90	91,00	0	309,78	0	309,78
16	38,70	10,00	28,70	77,50	0,70	259,14	0,60	258,54
18	37,60	13,00	24,60	72,00	1,30	233,90	1,46	232,44
20	36,00	16,50	19,50	62,00	2,10	192,84	2,99	189,85
22	34,30	19,30	15,00	51,00	3,00	151,14	5,00	146,14
24	32,50	21,00	11,50	38,50	3,70	108,11	6,71	101,40
16/								
02	30,50	22,00	8,50	31,00	4,50	81,69	8,55	73,14
04	28,70	22,50	6,20	27,00	5,20	66,95	10,11	56,84
06	27,00	22,60	4,40	23,00	6,00	53,65	11,72	41,93
08	25,40	22,50	2,90	20,70	6,90	45,43	13,41	32,02
10	24,00	22,10	1,90	18,20	7,50	37,74	14,32	23,42
12	22,60	21,70	0,90	16,00	8,20	31,24	15,37	15,87
14	21,60	21,00	0,60	14,00	9,00	26,13	16,33	9,80
16	20,60	20,50	0,10	12,00	10,00	21,36	17,71	3,65
18	19,50	19,50	0	10,70	10,70	18,03	18,03	0
Σ			344,70					3977,06

Tabela Nº 09. Cálculo do QD e SD - Chuvas complexas (29-30-31/AGO/1978)

TEMPO (dia/hora)	QT (m ³ /s)	QB (m ³ /s)	QD (m ³ /s)	CT (mg/l)	CB (mg/l)	ST (t/d)	SB (t/d)	SD (t/d)
29/								
20	3,2	3,0	0,20	4,0	0	1,11	0	1,11
22	3,8	3,0	0,80	14,0	0	4,60	0	4,60
24	4,4	3,0	1,40	34,0	0	12,93	0	12,93
30/								
02	5,3	3,0	2,30	62,0	0	28,39	0	28,39
04	6,4	3,0	3,40	110,0	0	60,83	0	60,83
06	7,7	3,0	4,70	168,0	0	111,77	0	111,77
08	9,4	3,0	6,40	187,0	0	151,87	0	151,87
10	11,4	3,0	8,40	205,0	0	201,92	0	201,92
12	14,0	3,0	11,00	199,0	0	240,71	0	240,71
14	16,8	3,0	13,80	182,0	0	264,18	0	264,18
16	19,0	2,9	16,10	150,0	0	246,24	0	246,24
18	20,0	2,9	17,10	111,0	0	191,81	0	191,81
20	20,0	3,2	16,80	82,0	1,0	141,70	0,28	141,42
22	19,6	4,0	15,60	65,0	2,0	110,07	0,69	109,38
24	18,9	5,5	13,40	56,0	3,0	91,45	1,43	90,02
31/								
02	18,0	8,4	9,60	49,0	4,0	76,20	2,90	73,30
04	17,1	10,9	6,20	42,0	5,0	62,05	4,71	57,34
06	16,3	12,1	4,20	36,0	6,0	50,70	6,27	44,43
08	15,5	12,9	2,60	32,0	7,0	42,85	7,80	35,05
10	14,8	13,2	1,60	27,0	8,0	34,53	9,12	25,40
12	14,1	13,2	0,90	23,0	9,0	28,02	10,26	17,76
14	13,5	13,1	0,40	19,0	10,0	22,16	11,32	10,84
16	13,0	12,8	0,20	15,0	11,0	16,85	12,17	4,68
18	12,5	12,5	0	12,0	12,0	12,96	12,96	0
Σ			157,10					2125,97

Tabela Nº 10. Cálculo de QD e SD - Chuvas complexas (7-8-9-/SET/1978)

TEMPO (Dia/hora)	QT (m ³ /s)	QB (m ³ /s)	QD (m ³ /s)	CT (mg/l)	CB (mg/l)	ST (t/d)	SB (t/d)	SD (t/d)
07/								
20	2,71	2,71	0	0	0	0	0	0
22	2,70	2,66	0,04	1,20	0	0,28	0	0,28
24	2,70	2,62	0,08	3,50	0	0,82	0	0,82
08/								
02	3,10	2,60	0,50	8,00	0	2,14	0	2,14
04	3,80	2,59	1,21	14,20	0	4,66	0	4,66
06	4,50	2,58	1,92	24,50	0	9,53	0	9,53
08	5,25	2,56	2,69	30,80	0	13,97	0	13,97
10	6,00	2,54	3,46	54,00	0	27,99	0	27,99
12	6,80	2,52	4,28	76,00	0	44,65	0	44,65
14	7,50	2,51	4,99	99,00	0	64,15	0	64,15
16	8,13	2,51	5,62	105,50	0	74,11	0	74,11
18	8,75	2,51	6,24	105,50	0	79,76	0	79,16
20	9,25	2,50	6,75	102,00	0	81,52	0	81,52
22	9,60	2,50	7,10	96,00	0	79,63	0	79,63
24	9,70	2,60	7,10	84,00	0,20	70,40	0,04	70,36
09/								
02	9,60	3,05	6,55	62,00	0,50	51,43	0,13	51,30
04	9,50	3,90	5,60	34,00	0,80	27,91	0,27	27,64
06	9,35	5,00	4,35	25,00	1,00	20,20	0,43	19,77
08	9,20	5,95	3,25	20,50	1,10	16,30	0,57	15,73
10	9,02	6,65	2,37	18,20	1,20	14,18	0,69	13,49
12	8,83	7,15	1,68	17,30	1,50	13,20	0,93	12,27
14	8,65	7,40	1,25	16,90	1,80	12,63	1,15	11,48
16	8,44	7,50	0,94	16,50	2,00	12,03	1,30	10,73
18	8,25	7,55	0,70	16,20	2,20	11,55	1,44	10,11
20	8,06	7,60	0,46	16,00	2,50	11,44	1,64	9,80
22	7,90	7,57	0,33	13,50	2,80	9,21	1,83	7,38
24	7,75	7,52	0,23	10,05	3,00	6,73	1,95	4,78
10/								
02	7,60	7,47	0,13	8,00	3,30	5,25	2,13	3,12
04	7,48	7,40	0,08	6,30	3,50	4,07	2,24	1,83
06	7,36	7,30	0,06	5,00	3,80	3,18	2,40	0,78
08	7,25	7,25	0	4,00	4,00	2,51	2,51	0
Σ			79,96					753,20

Tabela Nº 11. Cálculo de QD e SD - Chuvas complexas (13-14-15-16/SET/1978)

TEMPO (dia/hora)	QT (m ³ /s)	QB (m ³ /s)	QD (m ³ /s)	CT (mg/l)	CB (mg/l)	ST (t/d)	SB (t/d)	SD (t/d)
13/								
20	3,80	3,56	0,24	3,30	0	1,08	0	1,08
22	4,30	3,50	0,80	17,00	0	6,32	0	6,32
24	5,20	3,42	1,78	40,00	0	17,97	0	17,97
14/								
2	6,90	3,36	3,54	62,00	0	36,96	0	36,96
4	9,10	3,30	5,80	84,00	0	66,04	0	66,04
6	10,90	3,26	7,64	116,00	0	109,24	0	109,24
8	12,20	3,21	8,99	125,00	0	131,76	0	131,76
10	13,10	3,19	9,91	137,00	0	155,06	0	155,06
12	14,00	3,15	10,85	140,00	0	169,34	0	169,34
14	14,70	3,10	11,60	136,00	0	172,73	0	172,73
16	15,20	3,07	12,13	114,00	0	149,71	0	149,71
18	15,70	3,03	12,67	67,00	0	90,88	0	90,88
20	16,10	3,00	13,10	52,00	0	72,33	0	72,33
22	16,40	2,98	13,42	46,00	0	65,18	0	65,18
24	16,55	2,95	13,60	42,00	0	60,06	0	60,06
15/								
2	16,40	3,70	12,70	38,00	0,10	53,84	0,03	53,81
4	16,20	5,10	11,10	35,00	0,20	48,99	0,09	48,90
6	16,00	7,20	8,80	31,50	0,50	43,55	0,31	43,23
8	15,75	8,90	6,85	28,00	0,80	38,10	0,62	37,49
10	15,50	10,15	5,35	24,50	1,00	32,81	0,88	31,93
12	15,25	11,10	4,15	21,00	1,10	27,67	1,05	26,61
14	14,95	11,70	3,25	18,00	1,20	23,25	1,21	22,04
16	14,70	12,05	2,65	15,20	1,30	19,31	1,35	17,95
18	14,40	12,20	2,20	13,00	1,50	16,17	1,58	14,59
20	14,10	12,30	1,80	12,00	1,70	14,62	1,81	12,81
22	13,75	12,30	1,45	11,00	1,90	13,07	2,02	11,05
24	13,50	12,20	1,30	9,70	2,10	11,31	2,21	9,10
16/								
2	13,15	12,15	1,00	8,70	2,20	9,88	2,31	7,58
4	12,80	12,05	0,75	7,70	2,40	8,52	2,50	6,02
6	12,50	11,90	0,60	6,90	2,70	7,45	2,78	4,68
8	12,20	11,80	0,40	6,00	2,90	6,32	2,96	3,37
10	11,90	11,60	0,30	5,00	3,00	5,14	3,01	2,13
12	11,60	11,40	0,20	4,60	3,10	4,61	3,05	1,56
14	11,30	11,20	0,10	4,00	3,20	3,91	3,10	0,81
16	11,00	11,00	0	3,50	3,50	3,31	3,33	0
Σ			191,02					1660,35

Tabela Nº 12. Cálculo dos coeficientes

EVENTOS 1978	VPR	VQD	VSD	$\bar{C} = \frac{VQD}{VPR}$	$QE = \frac{VQD}{A}$	$SE = \frac{VSD}{A}$	$\bar{K} = \frac{VSD}{VPR}$
*Ch. complexa	(m ³)	(m ³)	(t)	(-)	(mm)	(t/Km ²)	(t/m ³)
21-22-23/JUL	10081.200	3762.720	2945,74	0,373	12,138	9,502	2,92.10 ⁻⁴
23-24-25/JUL	6522.400	1307.520	322,35	0,200	4,218	1,040	0,49.10 ⁻⁴
*14-15-16/AGO	9.656.500	2481.840	331,42	0,257	8,006	1,069	0,34.10 ⁻⁴
*29-30-31/AGO	8717.200	1131.120	117,16	0,130	3,649	0,571	0,19.10 ⁻⁴
*07-08-09/SET	7374.900	575.712	62,77	0,078	1,857	0,202	0,08.10 ⁻⁴
*13-14-15-16/SET	12530.200	1375.344	138,16	0,110	4,437	0,446	0,11.10 ⁻⁴
03-04-05/NOV	13525.300	2764.440	692,54	0,204	8,918	2,234	0,51.10 ⁻⁴

VPR = Volume de precipitação

VQD = Volume de escoamento superficial

VSD = Deplúvio produzido

\bar{C} = Coeficiente médio de escoamento superficial

QE = Precipitação efetiva

SE = Sedimento efetivo mobilizado

\bar{K} = Coeficiente médio de produção de deplúvio.

nº 12.

49) Adoção dos coeficientes de produção de deplúvio para cada precipitação

O coeficiente médio de produção de deplúvio, determinado para cada evento, é utilizado como base na adoção dos coeficientes relativos a cada chuva de duração unitária de 6 horas, considerada na análise dos eventos de chuvas complexas.

A produção de deplúvio numa bacia é maior no início de uma chuva que no seu final, devido a existência de maior quantidade de material solto disponível ao transporte (EINSTEIN, 1964).

Portanto, supõe-se que o valor do coeficiente de produção de deplúvio é maior nas primeiras chuvas de um conjunto de chuvas sucessivas, que nas finais.

O coeficiente de produção de deplúvio, para cada chuva unitária, é adotado em ordem de grandeza decrescente, com a ocorrência das sucessivas precipitações componentes de uma chuva complexa, assumindo, o coeficiente médio, a posição central.

Os valores adotados de K estão relacionados na planilha de cálculo do Sedimentograma Unitário para chuvas complexas nas Tabelas nºs 13, 14, 15 e 16.

Simultaneamente, determinaram-se os coeficientes de escoamento superficial para cada chuva unitária dos eventos de chuvas complexas.

Tabela Nº 13. Cálculo do SU (1,6) - Chuvas complexas (14-15-16/AGO/1978)

TEMPO (Δt6h)	SD (t/d)	SU Adotado (Km ² /d)							ΣSDPRi (t/d)	SDPR* (t/d)	SU (Km ² /d)
		15	120	300	400	300	100	20			
1	3,49	3,89							3,89	-	-
2	37,23	*	31,08						31,08	6,15	112,06
3	150,17	2,15	*	77,70					79,85	70,32	137,90
4	291,55	2,01	17,16	*	103,60				122,77	168,78	330,98
5	344,09		16,08	42,90	*	77,70			136,68	207,41	406,73
6	258,54			40,20	57,20	*	25,90		123,30	135,24	265,21
7	146,14				53,60			5,18	108,68	37,46	73,46
8	56,84					40,20	14,30	*	54,50	2,34	4,59
9	23,42						13,40	2,86	16,26	-	-
10	3,65							2,68	2,68	-	-
		13,53	128,95	315,49	403,37	282,60	86,73	12,29			
1	3,49	3,50							3,50	-	-
2	37,23	*	33,40						33,40	3,83	7,51
3	150,17	1,93	*	81,71					83,65	66,52	130,45
4	291,55	1,81	18,44	*	104,47				124,62	166,83	327,15
5	344,09		17,28	45,12	*	73,19			135,19	208,50	408,87
6	258,54			42,28	57,68	*	22,46		122,42	136,12	266,93
7	146,14				54,05			3,18	97,65	48,49	95,10
8	56,84					37,87	12,40	*	50,27	6,57	12,88
9	23,42						11,62	1,76	13,38	-	-
10	3,65							1,65	1,65	-	-
		10,52	129,70	321,32	406,12	274,77	90,91	12,59			
SU FINAL		10,0	130,0	320,0	410,0	270,0	90,0	10,0			

Tabela Nº 14. Cálculo do SU (1,6) - Chuvas complexas (29-30-31/AGO/1978)

$$PR1 = 13,12 \text{ mm} \quad K1 = 0,19 \cdot 10^{-4} \text{ t/m}^3 \quad SDPRi = Ki \cdot PRi \cdot 10^3 \cdot SU = 0,249 \cdot SU \quad SU = \frac{SDPR^* \cdot 10^{-4}}{K^* \cdot PR^*} = 3,509 \cdot SDPR^*$$

$$PR^* = 15,00 \text{ mm} \quad K^* = 0,19 \cdot 10^{-4} \text{ t/m}^3$$

TEMPO (Δt6h)	SD (t/d)	SU Adotado (Km ² /d)							ΣSDPRi (t/d)	SDPR* (t/d)	SU (Km ² /d)
		20	220	500	400	100	50	20			
1	4,60	4,98							4,98	-	-
2	60,83	*	54,78						54,78	6,05	21,23
3	201,92		*	124,50					124,50	77,42	271,67
4	246,24			*	99,60				99,60	146,64	514,56
5	109,38				*	24,90			24,90	84,48	296,44
6	57,34					*	12,45		12,45	44,89	157,52
7	25,40						*	4,98	4,98	20,42	71,65
8	4,68							*	0	4,68	16,42
		20,61	240,00	507,28	348,22	128,76	60,83	18,21			
1	4,60	5,13							5,13	-	-
2	60,83	*	59,63						59,63	1,07	3,75
3	201,92		*	126,31					126,31	75,61	265,31
4	246,24			*	86,71				86,71	159,73	559,80
5	109,38				*	32,06			32,06	77,32	271,31
6	57,34					*	15,15		15,15	42,19	148,06
7	25,40						*	4,53	4,53	20,87	73,22
8	4,68							*	-	4,68	16,42
		12,18	252,65	533,54	309,77	138,41	67,02	17,32			
SU FINAL		10,0	250,0	530,0	290,0	130,0	70,0	15,0			

Tabela Nº 15. Cálculo do SU (1,6) - Chuvas complexas (07-08-09/SET/1978)

		SU Adotado (Km ² /d)							ESDPRi	SDPR*	SU
TEMPO	SD	15	100	350	550	300	50	10	(t/d)	(t/d)	(Km ² /d)
(Δt6h)	(t/d)										
1	0,28	0,23							0,23	-	-
2	4,66	*	4,50						4,50	0,16	1,23
3	27,99	0,05	*	15,75					15,80	12,20	93,93
4	74,11	0,04	0,90	*	24,74				25,69	48,42	372,93
5	79,63		0,80	3,15	*	13,50			17,45	62,18	478,91
6	27,64			2,80	4,95	*	2,25		10,00	17,74	135,86
7	13,49				4,40	2,70	*	0,45	7,55	5,94	45,75
8	10,73					2,40	0,45	*	2,85	7,88	60,69
9	7,38						0,40	0,09	0,49	-	-
10	1,83							0,08	0,08	-	-
		3,12	96,96	361,47	514,46	217,93	47,87	35,35			
1	0,28	0,14							0,14	-	-
2	4,66	*	4,36						4,36	0,30	2,29
3	27,99	0,03	*	16,27					16,30	11,69	90,04
4	74,63	0,02	0,87	*	23,15				24,05	50,58	389,58
5	79,63		0,78	3,25	*	9,81			13,84	65,79	506,75
6	27,64			2,89	4,63	*	2,15		9,67	17,97	138,37
7	13,49				4,12	1,96	*	1,59	7,67	5,82	44,81
8	10,73					1,74	0,43	*	2,17	8,56	65,93
9	7,38						0,38	0,32	0,70	-	-
10	1,83							0,28	0,28	-	-
		2,70	93,50	375,53	510,60	178,15	46,34	50,64			
SU FINAL		3,0	90,0	390,0	510,0	170,0	50,0	10,0			

$$\begin{aligned}
 PR1 &= 5,00 \text{ mm} & K1 &= 0,09 \cdot 10^{-4} \text{ t/m}^3 \\
 PR^* &= 16,23 \text{ mm} & K^* &= 0,08 \cdot 10^{-4} \text{ t/m}^3 \\
 PR2 &= 1,28 \text{ mm} & K2 &= 0,07 \cdot 10^{-4} \text{ t/m}^3 \\
 PR3 &= 1,28 \text{ mm} & K3 &= 0,06 \cdot 10^{-4} \text{ t/m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 SDPRi &= (K1 \cdot PRi \cdot 10^3) \cdot SU = 0,045 \text{ t/m}^3 \\
 &= 0,009 \text{ t/m}^3 \\
 &= 0,008 \text{ t/m}^3
 \end{aligned}$$

$$SU = SDPR^* \cdot \frac{10^{-3}}{K^* \cdot PR^*} = 7.702 \cdot SDPR^*$$

Tabela N) 16. Cálculo do SU (1,6) - Chuvas Complexas (13-14-15-16/SET/1978)

PR* = 25,00 mm	K* = 0,13.10 ⁻⁴								
PR1 = 9,04 mm	K1 = 0,12.10 ⁻⁴					0,108			
PR2 = 1,51 mm	K2 = 0,11.10 ⁻⁴					0,617			
PR3 = 1,50 mm	K3 = 0,10.10 ⁻⁴	t/m ³	SDPRi = (Ki.PRi).SU.10 ³ =			0,015	.SU	SU = SDPR* $\frac{10^{-3}}{K*PR*} = 3,077.SDPR*$	
PR4 = 1,69 mm	K4 = 0,09.10 ⁻⁴					0,015			
PR5 = 1,68 mm	K5 = 0,08.10 ⁻⁴					0,013			

TEMPO (Δt6h)	SD (t/d)	SU Adotado (Km ² /d)							ESDRI (t/d)	SDPR* (t/d)	SU (Km ² /d)
		20	200	450	300	100	50	10			
1	6,32	*							0	6,32	19,45
2	66,04	2,16	*						2,16	63,88	196,56
3	155,06	0,34	21,60	*					21,94	133,12	409,61
4	149,71	0,30	3,40	48,60	*				52,30	97,41	299,73
5	65,18	0,30	3,00	7,65	32,40	*			43,35	21,83	67,17
6	48,90	0,26	3,00	6,75	5,10	10,80	*		25,91	22,99	70,74
7	31,93		2,60	6,75	4,50	1,70	5,40	*	20,95	10,98	33,79
8	17,95			5,85	4,50	1,50	0,85	1,08	13,78	-	-
9	11,05				3,90	1,50	0,75	0,17	6,32	-	-
10	6,02					1,30	0,75	0,15	2,20	-	-
11	2,13						0,65	0,15	0,80	-	-
12	0							0,13	0,13	-	-
		19,72	198,28	429,81	299,87	83,59	60,37	21,89			
1	6,32	*							0	6,32	19,45
2	66,04	2,13	*						2,13	63,91	196,65
3	155,06	0,34	21,41	*					21,75	133,31	410,20
4	149,71	0,30	3,37	46,42	*				50,09	99,72	306,54
5	65,18	0,30	2,97	7,31	32,39	*			42,96	22,22	68,36
6	48,90	0,26	2,97	6,45	5,10	9,03	*		23,80	25,10	77,22
7	31,93		2,58	6,45	4,50	1,42	6,52	*	21,46	10,47	32,20
8	17,93			5,59	4,50	1,25	1,03	2,36	14,73	-	-
9	11,05				3,90	1,25	0,91	0,37	6,43	-	-
10	6,02					1,09	0,91	0,33	2,32	-	-
11	2,13						0,78	0,33	1,11	-	-
12	0							0,28	0,28	-	-
		19,59	197,47	420,00	303,21	75,98	68,80	27,05			
SU FINAL		20,0	200,0	450,0	300,0	100,0	50,0	20,0			

Como o coeficiente de escoamento superficial traduz a percentagem do volume de água precipitada, que é transformada em escoamento superficial, é lógico supor-se que esse valor aumente com o decorrer das precipitações. Dessa forma, os coeficientes de escoamento superficial foram adotados em ordem de grandeza cronologicamente crescente tomando-se por base o coeficiente médio, calculado no passo anterior.

Os valores adotados constam na planilha de cálculo do hidrograma Unitário para chuvas complexas, nas Tabelas nº 17, 18, 19 e 20.

5º) Adoção do Sedimentograma Unitário sob forma de histograma

O método da resolução por aproximações sucessivas, para se chegar ao Sedimentograma Unitário final, requer a adoção de um Sedimentograma Unitário inicial como ponto de partida.

A rapidez da convergência aos valores finais depende da semelhança dos valores adotados com os valores finais.

O conhecimento das formas dos Sedimentogramas Unitários obtidos para chuvas isoladas e da variação dos valores de descarga de deplúvio possibilitaram adotar um Sedimentograma Unitário aproximado para cada evento.

Para cada evento, foi adotado um Sedimentograma Unitário em forma de histograma, com intervalos de tempo de 6 horas correspondentes ao período unitário do estudo, como pode ser visto nas planilhas de cálculo das Tabelas nº 13, 14, 15

Tabela Nº 17. Cálculo do HU (10,6) - Chuvas complexas (14-15-16/AGO/1978)

PR1 = 7,20 mm C1 = 0,256
 PR* = 15,00 mm C* = 0,257
 PR2 = 4,48 mm C2 = 0,258
 PR3 = 4,47 mm C3 = 0,259

$$QDPRI = \left(\frac{C_i \cdot PR_i}{10} \right) \cdot QU = 0,184 \cdot QU \quad QU = \frac{10}{C^* \cdot PR^*} \cdot QDPR^* = 2.594 \cdot QDPR^*$$

TEMPO (Δt6h)	QD (m³/s)	QU Adotado (m³/s)							EQDPRI (m³/s)	CDPRI (m³/s)	QU (m³/s)
		2	10	25	45	35	20	2			
1	0,40	0,37							0,37	-	-
2	2,70	*	1,84						1,84	0,86	2,23
3	9,55	0,23	*	4,60					4,83	4,72	12,24
4	21,00	0,23	1,16	*	8,28				9,67	11,33	29,39
5	29,00		1,16	2,90	*	6,44			10,50	18,50	47,99
6	28,70			2,90	5,22	*	3,68		11,80	16,90	43,84
7	15,00				5,22	4,06	*	0,37	9,65	5,35	13,88
8	6,20					4,06	2,32	*	6,39	0	0
9	1,90						2,32	0,23	2,55	-	-
10	0,10							0,23	0,23	-	-
		2,12	11,12	27,20	46,50	39,42	16,94	1,00			
1	0,40	0,39							0,39	-	-
2	2,70	*	2,05						2,05	0,65	1,70
3	9,55	0,25	*	5,00					5,25	4,30	11,14
4	21,00	0,25	1,29	*	8,56				10,10	10,90	28,28
5	29,00		1,29	3,16	*	7,25			11,70	17,30	44,87
6	28,70			3,16	5,39	*	3,12		11,67	17,03	44,18
7	15,00				5,39	4,57	*	0,18	10,14	4,87	12,60
8	6,20					4,57	1,97	*	6,55	0	0
9	1,90						1,97	0,12	2,09	-	-
10	0,10							0,12	0,12	-	-
		1,91	11,13	27,74	45,69	41,80	14,77	0,50			
QU FINAL		2,0	12,0	28,0	46,0	40,0	15,0	1,0			

Tabela Nº 18. Cálculo do HU (10,6) - Chuvas complexas (29-30-31/AGO/1978)

$$PR1 = 13,12 \text{ mm} \quad C1 = 0,128 \quad QDPRi = \frac{Ci \cdot PRi}{10} \cdot QU = 0,168 \cdot QU \quad QU = \frac{10}{C^* \cdot PR^*} \cdot QDPR^* = 5,128 \cdot QDPR^*$$

$$PR^* = 15,00 \text{ mm} \quad C^* = 0,130$$

TEMPO (Δt 6h)	QD (m ³ /s)	QU Adotado (m ³ /s)							$\Sigma QDPRi$ (m ³ /s)	QDPR* (m ³ /s)	QU (m ³ /s)
		5	15	35	50	30	5	1			
1	0,80	0,84							0,84	-	-
2	3,40	*	2,52						2,52	0,88	4,51
3	8,40		*	5,88					5,88	2,52	12,92
4	16,10			*	8,40				8,40	7,70	39,49
5	15,60				*	5,04			5,04	10,56	54,15
6	6,20					*	0,84		0,84	5,36	27,49
7	1,60						*	0,17	0,17	1,43	7,34
8	0,20							*	0	0,20	1,03
		4,76	13,96	37,25	52,08	28,75	6,17	1,02			
1	0,80	0,80							0,80	-	-
2	3,40	*	2,35						2,35	1,05	5,41
3	8,40		*	6,26					6,26	2,14	10,98
4	16,10			*	8,75				8,75	7,35	37,69
5	15,60				*	4,83			4,83	10,77	55,23
6	6,20					*	1,04		1,04	5,16	26,48
7	1,60						*	0,17	0,17	1,43	7,33
8	0,20							*	0	0,20	1,03
		4,94	12,47	37,47	53,66	27,62	6,75	1,03			
QU FINAL		3,0	13,0	38,0	53,0	27,0	7,0	2,0			

Tabela Nº 19. Cálculo do HU (10,6) - Chuvas complexas (07-08-09/SET/1978)

PR1 = 5,00 mm C1 = 0,076
 PR* = 16,23 mm C* = 0,078
 PR2 = 1,28 mm C2 = 0,080
 PR3 = 1,28 mm C3 = 0,082

$$QPRi = \left(\frac{Ci \cdot PRi}{10}\right) \cdot QU = \begin{matrix} 0,038 \\ 0,010 \\ 0,010 \end{matrix} \cdot QU \quad QU = QPR* \cdot \frac{10}{C* \cdot PR*} = 8,013 \cdot QPR*$$

TEMPO (Δt6h)	QD (m³/s)	QU Adotado (m³/s)							EQPRi (m³/s)	QPR* (m³/s)	QU (m³/s)
		1	15	30	45	40	10	5			
1	0,04	0,04							0,04	-	-
2	1,21	*	0,57						0,57	0,64	5,13
3	3,46	0,01	*	1,14					1,15	2,31	18,51
4	5,62	0,01	0,15	*	1,71				1,87	3,75	30,05
5	7,70		0,15	0,30	*	1,52			1,97	5,73	45,91
6	5,60			0,30	0,45	*	0,38		1,13	4,47	35,82
7	2,37				0,45	0,40	*	0,19	1,04	1,31	10,66
8	0,94					0,40	0,10	*	0,50	0,44	3,53
9	0,33						0,10	0,05	0,15	-	-
10	0,08							0,05	0,05	-	-
		3,07	16,76	30,03	45,46	37,91	10,33	4,27			
1	0,04	0,12							0,12	-	-
2	1,21	*	0,64						0,64	0,57	4,59
3	3,46	0,03	*	1,14					1,17	2,29	18,34
4	5,62	0,03	0,17	*	1,73				1,93	3,69	29,59
5	7,70		0,17	0,30	*	1,44			1,91	5,79	46,39
6	5,60			0,30	0,45	*	0,39		1,14	4,46	35,72
7	2,37				0,45	0,38	*	0,16	0,99	1,38	11,04
8	0,94					0,38	0,10	*	0,48	0,46	3,69
9	0,33						0,10	0,04	0,14	-	-
10	0,08							0,04	0,04	-	-
		3,83	17,55	29,81	45,93	36,82	10,68	3,98			
QU FINAL		2,0	15,0	31,0	46,0	37,0	11,0	1,5			

Tabela Nº 20. Cálculo do HU (10,6) - Chuvas complexas (13-14-15-16/SET/1978)

TEMPO (Δt6h)	QD (m³/s)	QU Adotado (m³/s)							ΣQPRi (m³/s)	QPR* (m³/s)	QU (m³/s)
		2	13	29	46	38	13	1			
1	0,80	*							0	0,80	3,02
2	5,80	0,20	*						0,20	5,60	21,15
3	9,91	0,03	1,27	*					1,30	8,61	32,48
4	12,13	0,03	0,22	2,84	*				3,09	9,04	34,11
5	13,42	0,04	0,22	0,49	4,51	*			5,26	8,16	30,80
6	11,10	0,04	0,25	0,49	0,78	3,72	*		5,28	5,82	21,96
7	5,35		0,25	0,55	0,78	0,65	1,27	*	3,50	1,85	6,97
8	2,65			0,55	0,87	0,65	0,22	0,10	2,39	-	-
9	1,45				0,87	0,72	0,22	0,02	1,83	-	-
10	0,75					0,72	0,25	0,02	0,99	-	-
11	0,30						0,25	0,02	0,27	-	-
12	0,02							0,02	0,02	-	-
		2,51	17,08	30,71	40,06	34,40	17,48	3,98			
1	0,80	*							0	0,80	3,02
2	5,80	0,25	*						0,25	5,55	20,96
3	9,91	0,04	1,67	*					1,71	8,20	30,95
4	12,13	0,04	0,29	3,01	*				3,34	8,79	33,18
5	13,42	0,05	0,29	0,52	3,93	*			4,79	8,63	32,59
6	11,10	0,05	0,32	0,52	0,68	3,37	*		4,94	6,16	23,24
7	5,35		0,32	0,58	0,68	0,58	1,71	*	3,87	1,48	5,59
8	2,65			0,58	0,76	0,58	0,30	0,39	2,61	-	-
9	1,45				0,76	0,65	0,30	0,07	1,78	-	-
10	0,75					0,65	0,33	0,07	1,05	-	-
11	0,30						0,33	0,08	0,41	-	-
12	0,02							0,08	0,08	-	-
		2,76	19,02	30,83	36,62	33,50	20,36	4,78			
QU FINAL		2,0	15,0	30,0	40,0	33,0	18,0	4,0			

e 16.

No caso de Hidrograma Unitário, o procedimento para adoção de valores iniciais é análogo ao caso do Sedimentograma Unitário. As Tabelas nº 17, 18, 19 e 20 mostram os procedimentos de cálculo dos Hidrogramas Unitários.

6º) Aplicação do Sedimentograma Unitário adotado para as precipitações verificadas, com exceção da maior

O Sedimentograma Unitário, adotado para cada evento, é aplicado a cada precipitação unitária, com exceção da maior, nos respectivos tempos de ocorrência.

A descarga de deplúvio, em cada intervalo de 6 horas, é calculada para cada precipitação, com exceção da maior, pela seguinte fórmula:

$$SDPR_i = K_i \cdot PR_i \cdot 10^3 \cdot SU$$

onde:

$SDPR_i$ = a descarga de deplúvio (em t/dia) que representa a média do intervalo de 6 horas, referente à precipitação i de uma chuva complexa;

K_i = coeficiente de produção de deplúvio (em t/m³), determinado no passo 4;

PR_i = i - ésima precipitação de duração 6 horas, ocorrida no evento;

SU = ordenada do Sedimentograma Unitário adotado, em Km²/dia;

10^3 = fator de transformação de unidades;

As Tabelas nº 13, 14, 15 e 16 mostram o desenvolvimento dos cálculos.

No caso de Hidrograma Unitário, o procedimento é análogo. O Hidrograma Unitário é aplicado a todas precipitações, com exceção da maior, nos respectivos tempos de ocorrência.

Os valores de escoamento superficial provenientes de cada precipitação são determinados pela fórmula seguinte:

$$QDPR_i = \left(\frac{C_i \cdot PR_i}{10} \right) \cdot QU$$

onde:

$QDPR_i$ = o escoamento superficial proveniente da i - ésima precipitação, considerada média do intervalo de 6 horas, dado em m^3/s ;

C_i = coeficiente de escoamento superficial, determinado para cada precipitação, como foi visto no passo 5 ;

PR_i = i - ésima precipitação ocorrida no evento,

QU = ordenadas do Hidrograma Unitário adotado, m^3/s ;

10 mm = unidade padrão de Hidrograma Unitário adotado.

O desenvolvimento desses cálculos consta nas Tabelas nº 17, 18, 19 e 20.

7º) Subtração do sedimentograma resultante do sedimentograma total de deplúvio

As descargas de deplúvio, obtidas pela aplicação do Sedimentograma Unitário às precipitações verificadas no evento,

com exceção da maior, são somadas nos respectivos tempos de ocorrência e acumuladas na coluna ΣSDPR_i (Tabelas Nº 13, 14, 15 e 16). Esses valores são, então, subtraídos da descarga total de deplúvio da coluna SD, obtidas das Tabelas Nº 08, 09, 10 e 11.

A coluna SDPR^* apresenta os valores de descarga de deplúvio, que se supõem provenientes da precipitação omitida.

Analogamente, na planilha de cálculo do Hidrograma Unitário (Tabelas Nº 17, 18, 19 e 20), a coluna QDPR^* refere-se às descargas de escoamento superficial, provenientes da precipitação omitida. Os valores de QDPR^* são obtidos pela subtração do somatório das descargas produzidas pelas precipitações verificadas (ΣQDPR_i), com exceção da maior, do escoamento superficial total (SD), obtida das Tabelas Nº 08, 09, 10 e 11.

8º) Redução do sedimentograma resultante em termos de Sedimentograma Unitário

O Sedimentograma Unitário de unidade padrão lt, para precipitação de duração 6 horas, ou seja, SU (1,6), é obtido pela seguinte fórmula:

$$\text{SU} = \frac{\text{SDPR}^* \cdot 10^{-3}}{\text{K}^* \cdot \text{PR}^*}$$

onde: SU = ordenadas do Sedimentograma Unitário SU (1,6), correspondentes a intervalos de 6 horas, em Km^2/dia ;
 SDPR^* = descargas de deplúvio provenientes da precipitação

ção omitida, em t/dia;

K^* = coeficiente de produção de deplúvio referente a precipitação omitida, em t/m^3 ;

PR^* = precipitação omitida, isto é, aquela que deriva o Sedimentograma Unitário, em mm;

10^{-3} = fator de transformação de unidades.

De forma idêntica, o HU (10,6) é obtido pela seguinte fórmula:

$$QU = \frac{QDPR^* \cdot 10}{C^* \cdot PR^*}$$

onde: QU = ordenadas do HU(10,6), correspondentes a intervalos de 6 horas, em m^3/s ;

QDPR* = escoamento superficial, proveniente da precipitação omitida, em m^3/s ;

C^* = coeficiente de escoamento superficial da precipitação omitida;

PR^* = precipitação omitida que gera o Hidrograma Unitário, em mm;

10 mm = unidade padrão do Hidrograma Unitário.

Os valores obtidos na primeira tentativa são corrigidos em relação aos anteriormente adotados, tomando-se a média entre esses dois valores. Os novos valores são, por sua vez, tomados para o início dos cálculos na segunda tentativa.

Após duas tentativas, obtiveram-se os Sedimentograma e Hidrograma Unitários para cada evento de chuvas complexas.

Os Sedimentogramas Unitários SU (1,6), obtidos em cada evento de chuvas complexas, estão graficados nas Figuras Nº 20, 21, 22 e 23. E os Hidrogramas Unitários, obtidos simultaneamente estão graficados, nas Figuras Nº 24, 25, 26 e 27.

3.2.6. Verificação dos Sedimentogramas Unitários obtidos

Os Sedimentogramas Unitários obtidos nos casos de chuvas complexas foram testados quanto a sua unidade.

Como o Sedimentograma Unitário corresponde a uma unidade de padrão de 1 t sobre a área da bacia, a seguinte identidade deve ser verificada:

$$(\Sigma SU) \cdot \frac{\Delta t}{24} = \text{Área da bacia}$$

Tomando-se intervalos de tempo de 2 horas, e ordenadas do Sedimentograma Unitário em Km²/dia, foram testados todos os Sedimentogramas Unitários obtidos.

A Tabela Nº 21 mostra esse teste, onde os valores obtidos apresentam-se bastante próximos aos da identidade.

Para os Hidrogramas Unitários, o teste é feito pela seguinte identidade:

$$(\Sigma QU) \cdot \frac{\Delta t}{10\text{mm}} = \text{Área da bacia}$$

Resultaram para todos os Hidrogramas Unitários obtidos,

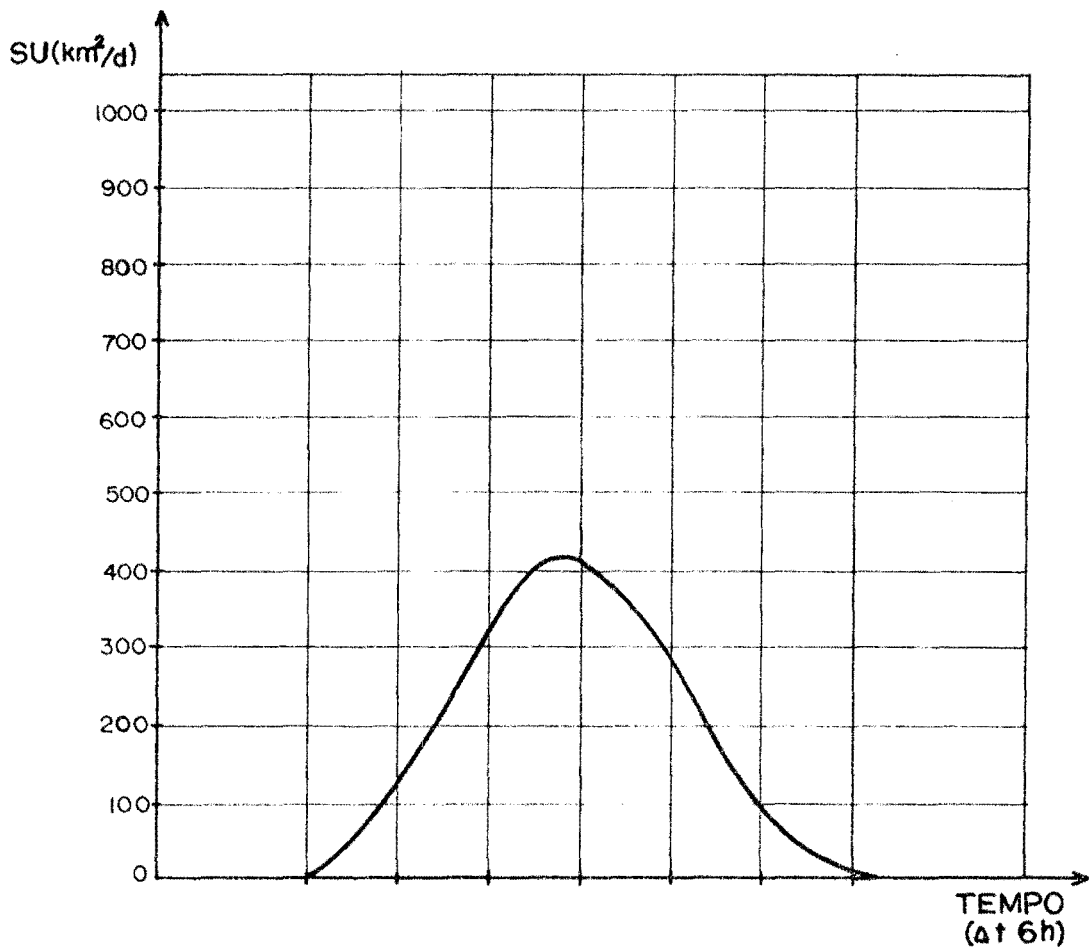


Figura Nº 20
SU (1,6)
CHUVAS COMPLEXAS (14-15-16 / AGO / 78)

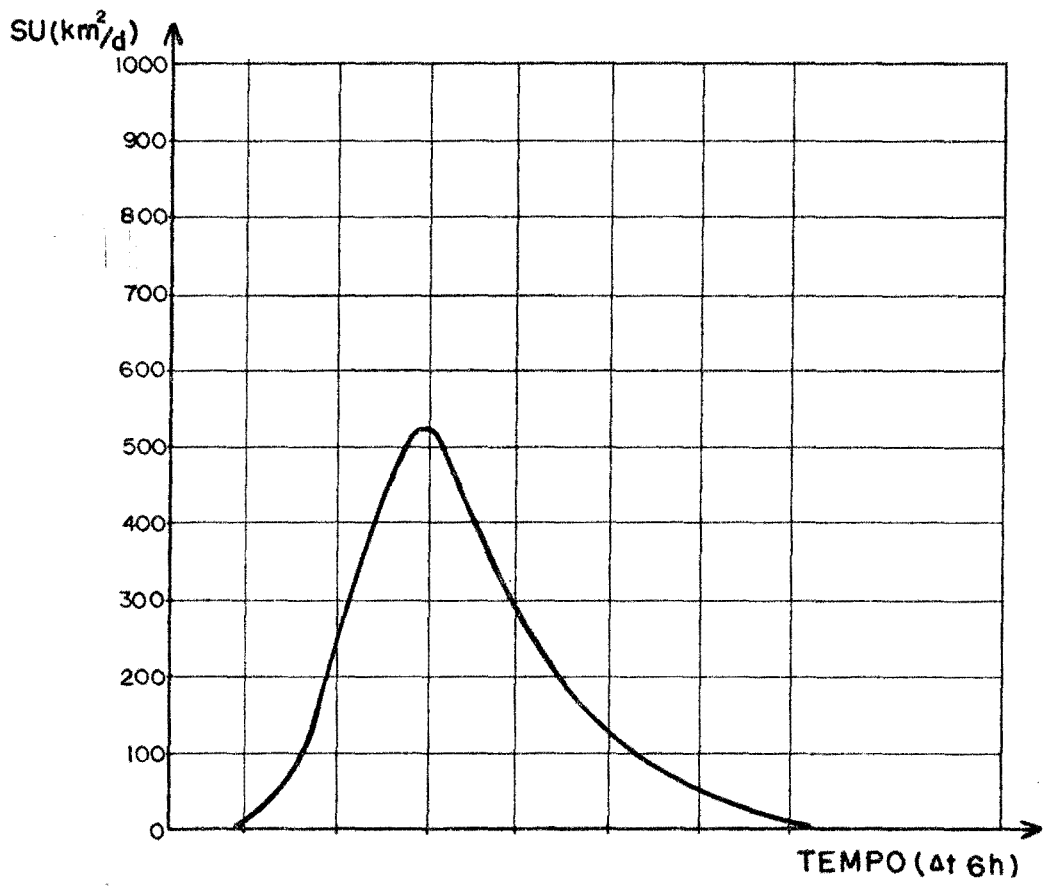


Figura Nº 21.-

SU (1,6)

CHUVAS COMPLEXAS (29-30-31/AGO/78)

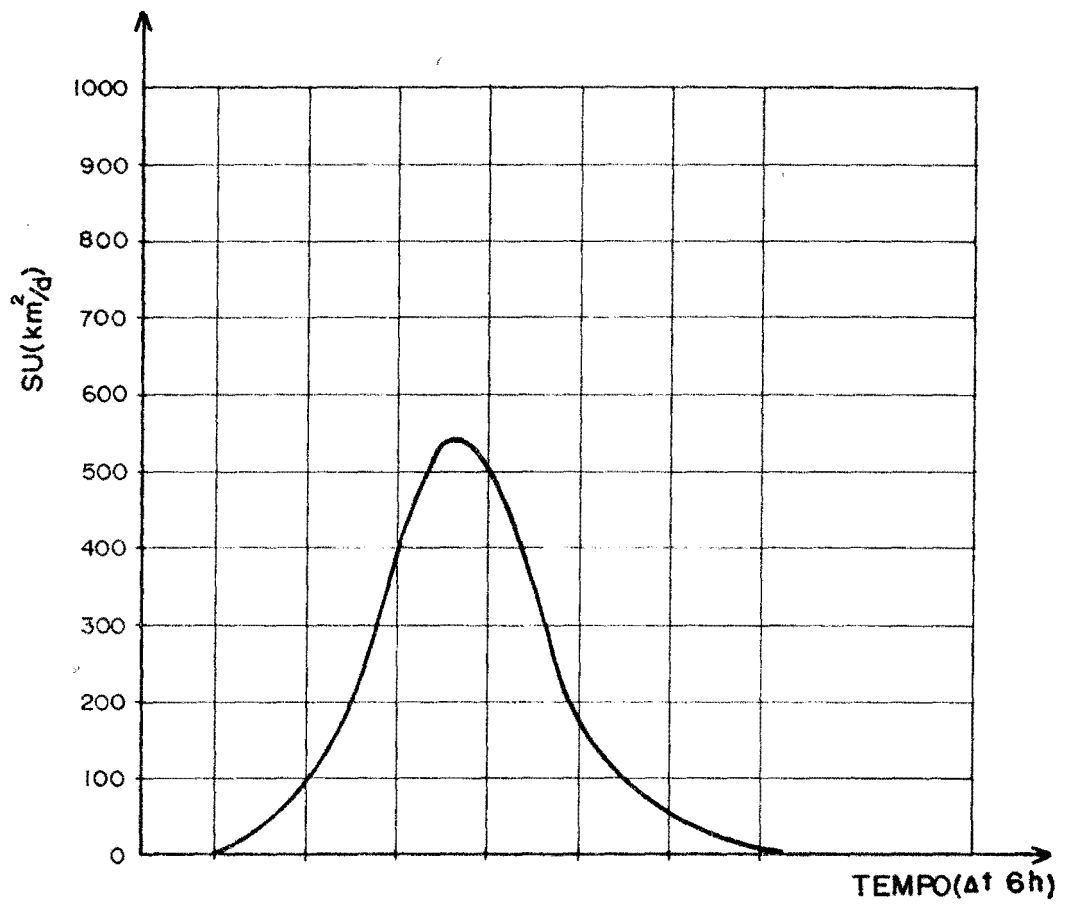


Figura Nº 22 .-

SU(1,6)

CHUVAS COMPLEXAS (7·8·9 /SET / 78)

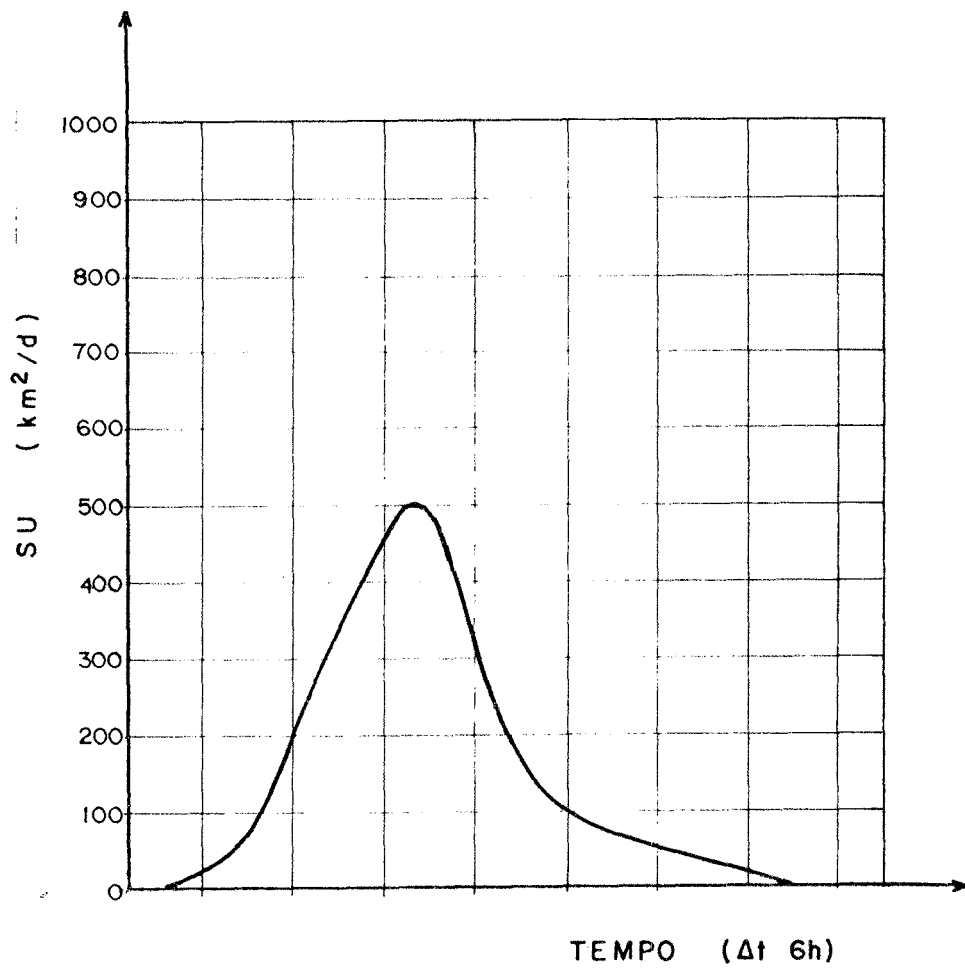


Figura N^o 23 .-

SU(1,6)

CHUVAS COMPLEXAS (13·14·15·16/SET/78)

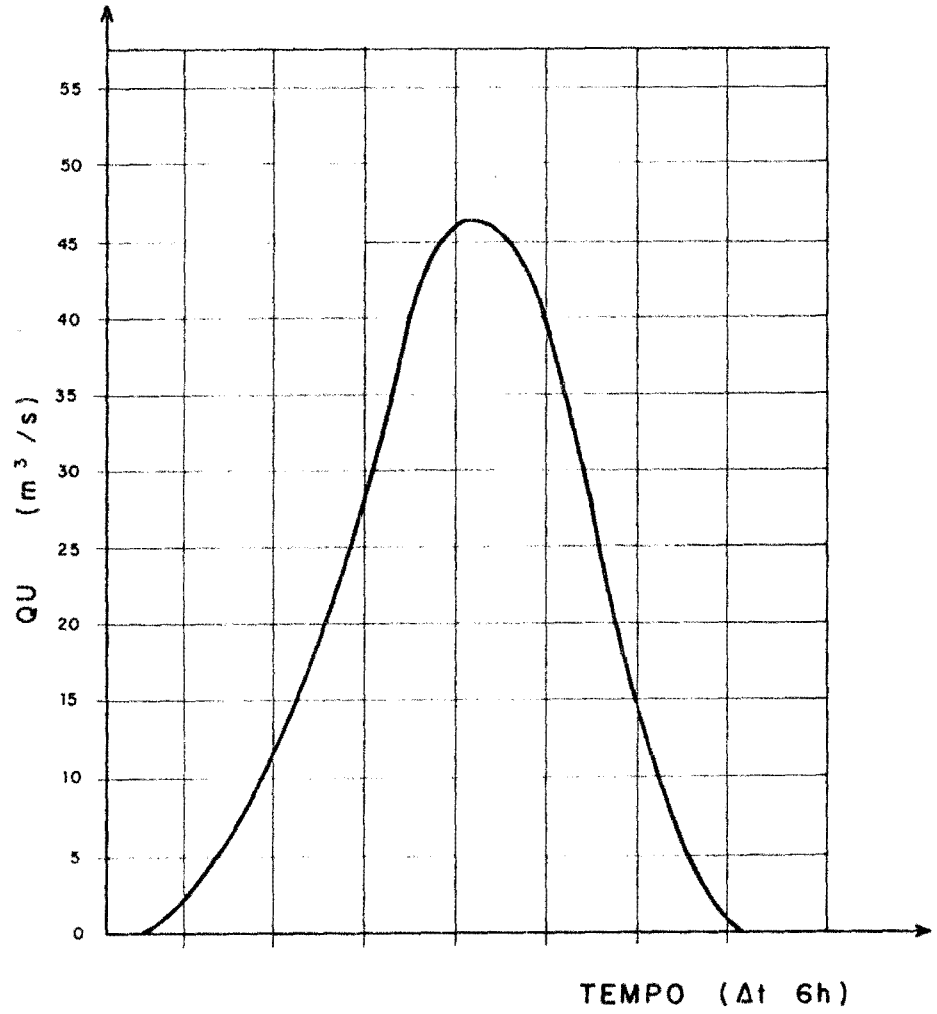


Figura N° 24 .-

HU (10,6)

CHUVAS COMPLEXAS (14 · 15 · 16 / AGO / 78)

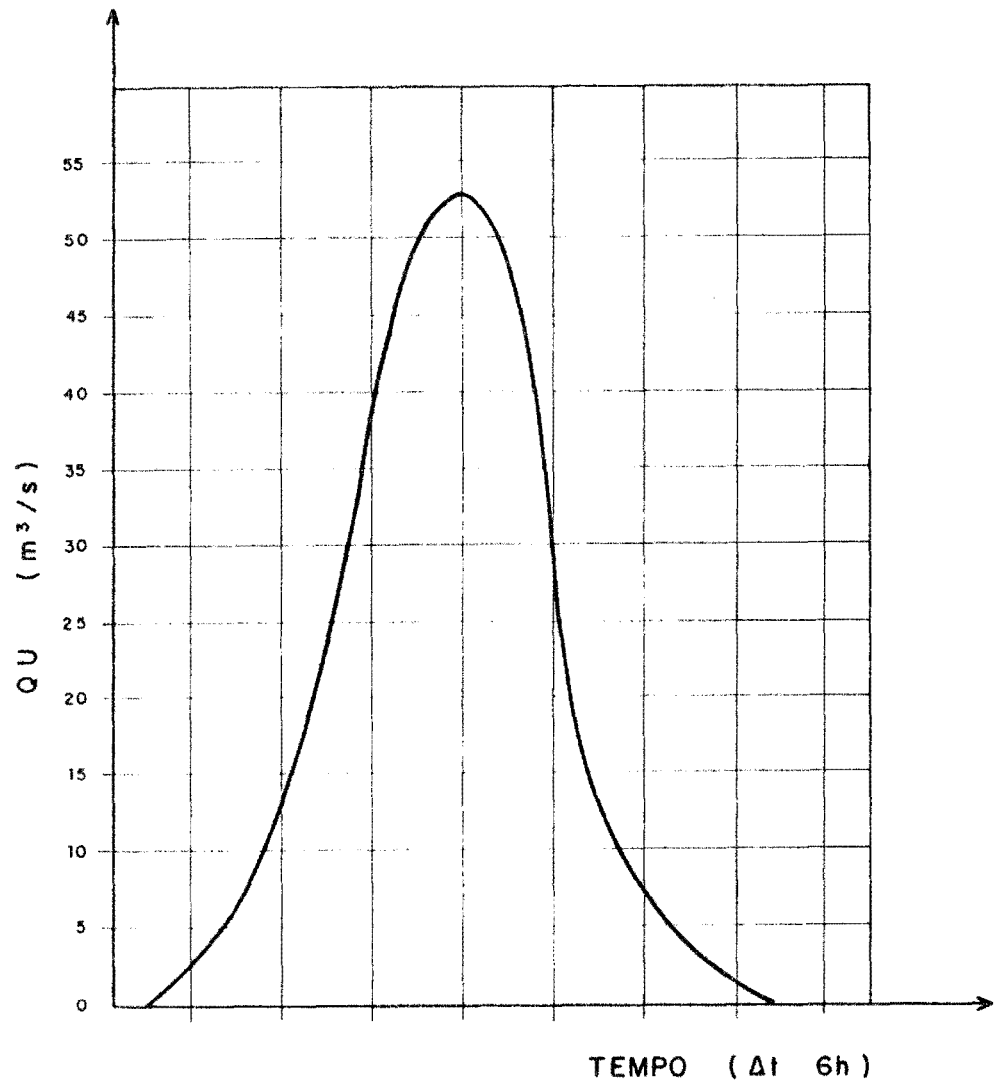


Figura Nº 25 .-

HU (10,6)

CHUVAS COMPLEXAS (29 · 30 · 31 / AGO / 78)

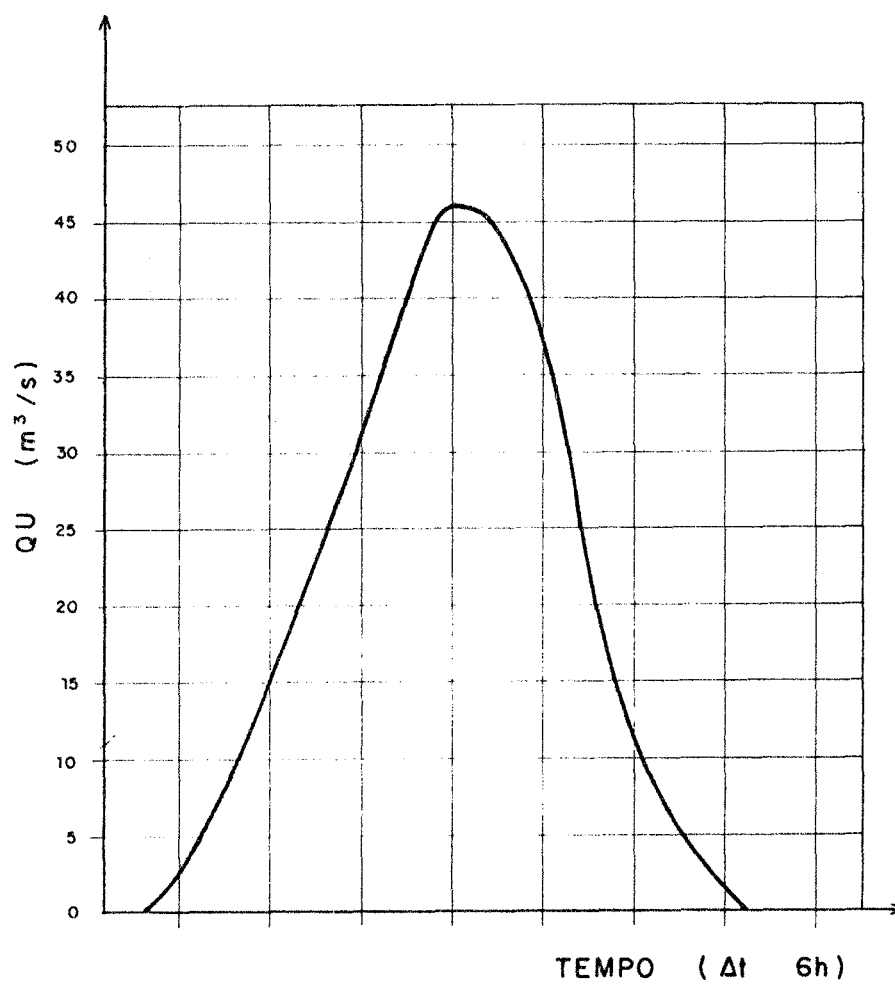


Figura Nº 26 .-

HU (10, 6)

CHUVAS COMPLEXAS (7-8-9 / SET / 78)

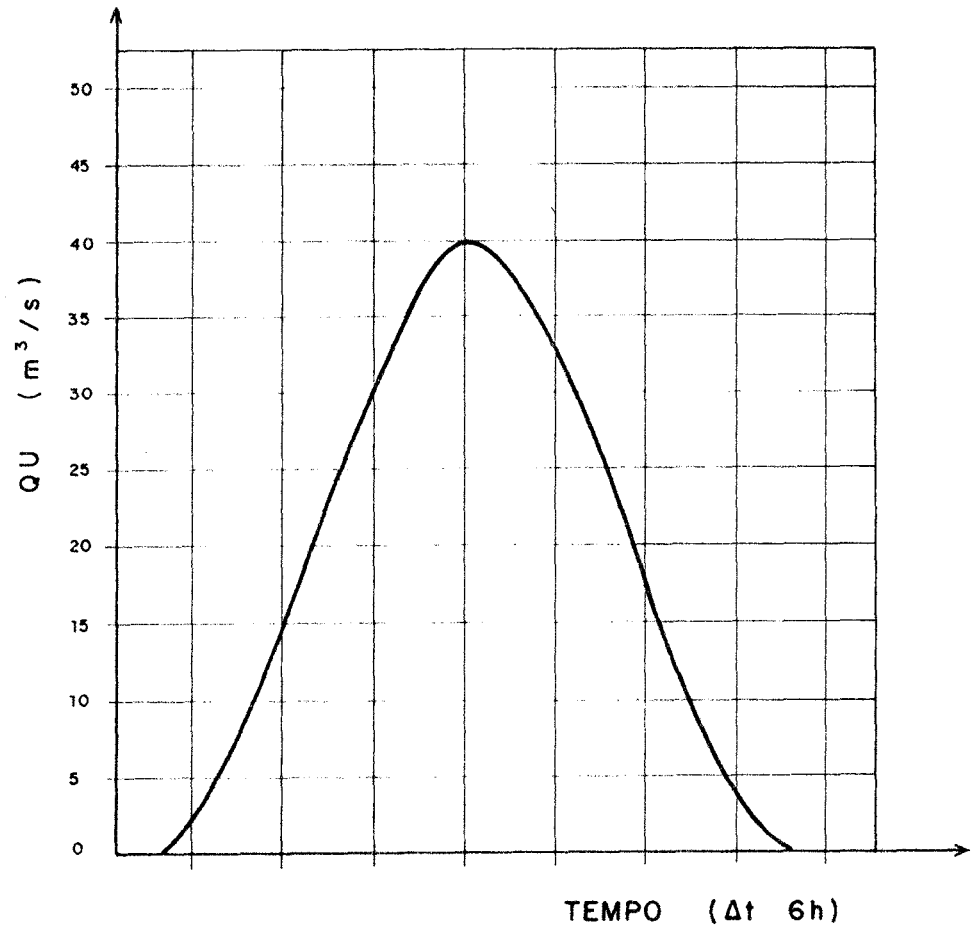


Figura N° 27.-

HU (10,6)

CHUVAS COMPLEXAS (13·14·15·16 / SET / 78)

valores de identidade aceitáveis, como se pode observar na Tabela Nº 21.

Outro teste aplicado na verificação dos Sedimentogramas e Hidrogramas Unitários foi aquele referente ao tempo de duração dos eventos, ou seja:

$$T_b = M + N - 1$$

onde: T_b = tempo de base do hidrograma e sedimentograma, dado em números de intervalos do tempo unitário considerado (Δt);

M = tempo de duração do Sedimentograma e Hidrograma Unitário, em número de intervalos Δt ;

N = duração de precipitação efetiva, em número de intervalos Δt .

Para todos os eventos, foi verificado esse teste, como mostra a Tabela Nº 21.

Tabela Nº 21. Verificações dos SU e HU obtidos

EVENTOS (* Ch. Complexa)	$(\Sigma QU) \cdot \Delta t / 10 \text{mm}$ $\cong 310 \text{ Km}^2$	$(\Sigma SU) \cdot \Delta t / 24$ $\cong 310 \text{ Km}^2$	$\Delta t = 6 \text{ h}$			$M+N-1$
			T_b	M	N	
21-22-23/JUL/78	310	310	7	7	1	7
23-24-25/JUL/78	310	310	7	7	1	7
* 14-15-16/AGO/78	311	312	10	7	4	10
* 29-30-31/AGO/78	308	311	8	7	2	8
* 07-08-09/SET/78	310	308	10	7	4	10
*13-14-15-16/SET/78	303	300	12	7	6	12

3.2.7. Escolha do Sedimentograma Unitário final

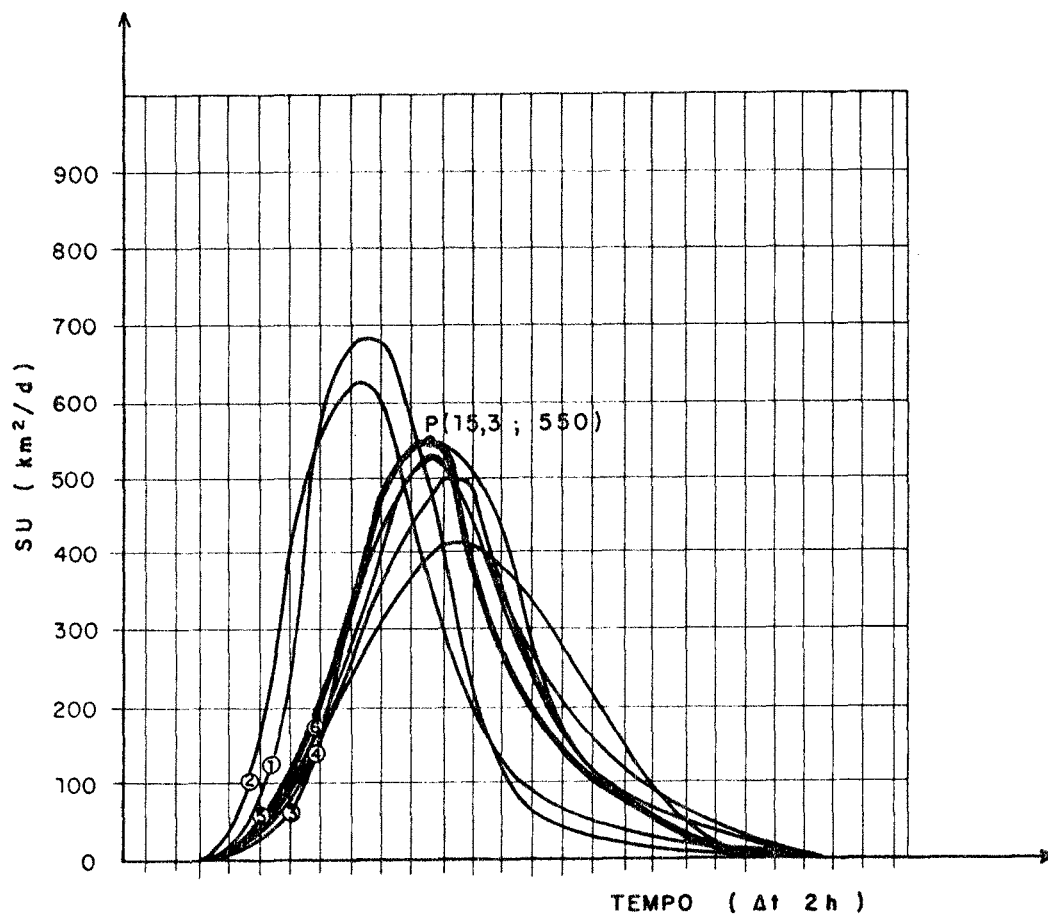
O Sedimentograma Unitário representativo das condições de produção de deplúvio na Bacia do Ric Forquetinha, durante o período entre 17 de julho e 17 de novembro de 1978, foi de terminado pelo confronto final dos Sedimentogramas Unitários obtidos em cada evento estudado.

Essa escolha é feita pela interpolação de um Sedimento grama médio, a sentimento, de modo a traduzir o sedimentogra ma aparentemente mais provável e representativo, face aos re sultados existentes.

Conforme o procedimento comumente utilizado na escolha do Hidrograma Unitário (LINSLEY, KOHLER, PAULHUS, 1949), o Se dimentograma Unitário médio é obtido pelo posicionamento do pico médio no confronto dos diversos Sedimentogramas Unitá rios.

As coordenadas do pico médio do Sedimentograma Unitário são dadas pela média aritmética das alturas máximas atingidas pelos diversos sedimentogramas e a média aritmética dos tem pos gastos para atingí-los. A Tabela nº 22 mostra a determi nação do pico médio.

O Sedimentograma Unitário final é traçado, a sentimento, com base no pico médio determinado e no confronto dos diver sos Sedimentogramas Unitários, obtidos para cada evento. Is to é mostrado na Figura nº 28.

Figura N^o 28 .-

OBTENÇÃO DO SU(1,6)

Da mesma forma, o Hidrograma Unitário, representativo das condições de escoamento superficial da Bacia durante o período estudado, é determinado conforme mostra a Tabela Nº 22 e Figura Nº 29.

Tabela Nº 22. Determinação do Pico Médio do SU e HU

EVENTOS/1978 (* Ch.Complexas)	HU		SU	
	Pico (m ³ /s)	Tempo de Ele vação (h)	Pico (Km ² /d)	Tempo de Ele vação (h)
21-22-23/JUL	51,5	12	685	11,0
23-24-25/JUL	52,0	12	625	10,5
*14-15-16/AGO	46,2	22	420	19,0
*29-30-31/AGO	53,0	21	530	15,0
*07-08-09/SET	46,0	21	540	19,0
*13-14-15/SET	40,0	21	500	17,0
MÉDIA	48,1	18,2	550	15,3

3.2.8. Relação entre sedimento efetivo mobilizado e precipitação efetiva (SE versus QE)

A premissa original do Método do Sedimentograma Unitário foi a de que o conceito de Hidrograma Unitário, aplicado ao hidrograma de escoamento superficial, é diretamente aplicável na análise do sedimentograma, quando este é constituído, predominantemente, de deplúvio.

O Hidrograma Unitário é aplicado na geração de hidrogra

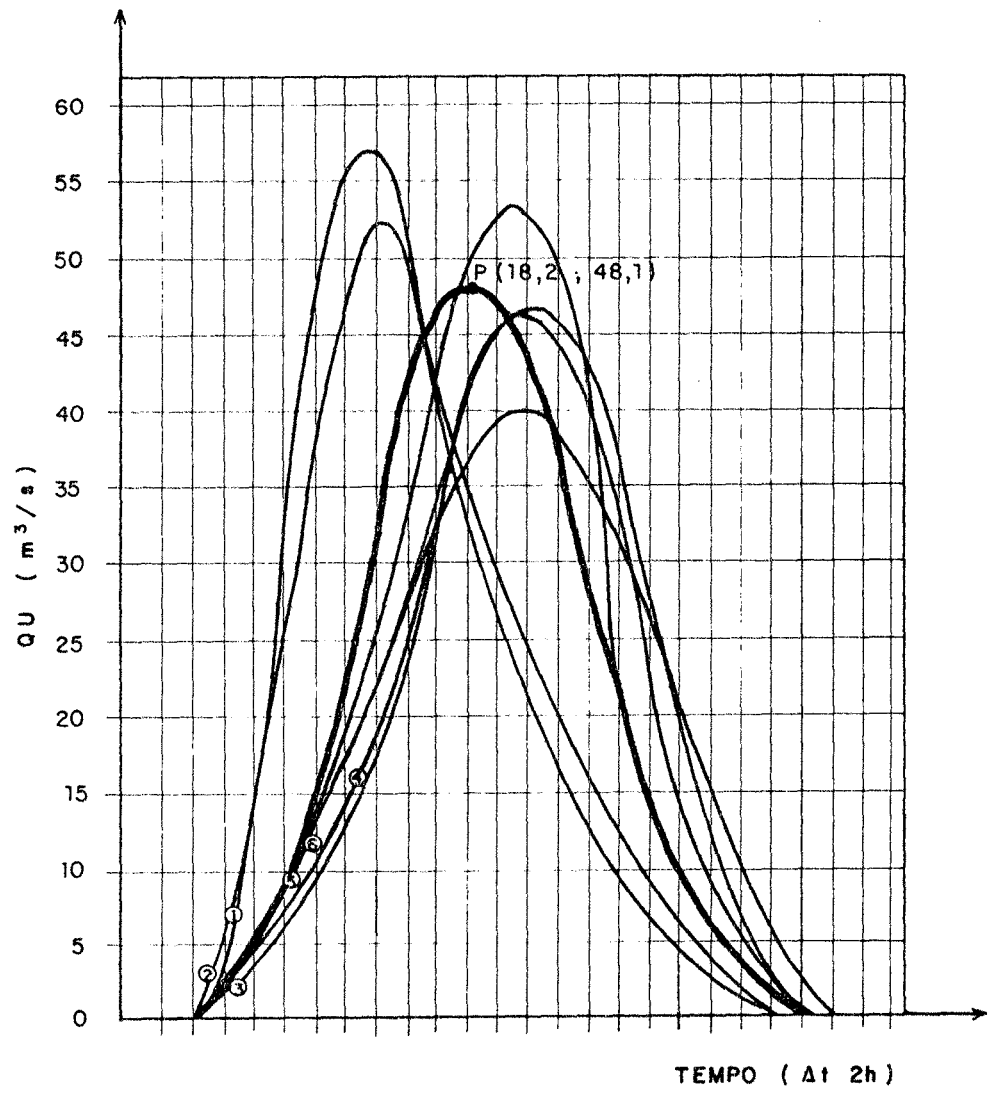


Figura Nº 29 .-

OBTENÇÃO DO HU(10,6)

mas de cheia, multiplicando-se suas ordenadas pela precipitação efetiva do evento considerado.

Analogamente, o Sedimentograma Unitário é aplicado na geração do sedimentograma de deplúvio, para um evento pluviOSO, multiplicando-se as suas ordenadas pelo correspondente sedimento efetivo mobilizado (SE).

Entretanto, para determinação do sedimento efetivo mobilizado, é necessário conhecer-se a quantidade total de deplúvio produzido no evento. Essa quantidade é, normalmente, desconhecida quando se deseja estimar o sedimentograma para uma dada precipitação.

Para suprir essa deficiência, desenvolveu-se uma relação entre o sedimento efetivo mobilizado e a precipitação efetiva, com base nos eventos considerados no presente estudo. Desta forma, o Sedimentograma Unitário é aplicável na geração de sedimentograma para um evento particular, multiplicando-se suas ordenadas, pelo sedimento efetivo mobilizado (SE), obtido da relação SE versus QE, conhecendo-se a precipitação efetiva (QE) do evento considerado.

A relação SE versus QE é determinada pela reta de regressão dos mínimos quadrados dos valores de SE para QE, verificados nos eventos selecionados para a obtenção do Sedimentograma Unitário. Foi também incluído o evento ocorrido em 03-04-05/novembro, com o intuito de melhorar a representatividade da relação.

Considerando-se a existência de uma relação linear entre os logarítmos dos valores de SE e QE, a relação pode ser descrita sob forma de equação da reta dos mínimos quadrados, como segue (SPIEGEL, 1971):

$$\text{Log SE} = a_0 + a_1 \cdot \text{log QE}$$

ou
$$Y = a_0 + a_1 \cdot X$$

onde: $Y = \text{log SE} = \text{logarítmo dos valores de sedimento efetivo mobilizado};$

$X = \text{log QE} = \text{logarítmo dos valores de precipitação efetiva};$

$a_0 = \text{coeficiente de origem da reta};$

$a_1 = \text{coeficiente angular da reta de regressão de } Y \text{ para } X.$

As equações normais da reta dos mínimos quadrados são:

$$\sum Y = a_0 \cdot N + a_1 \cdot \sum X$$

$$\sum XY = a_0 \cdot \sum X + a_1 \cdot \sum X^2$$

onde os coeficientes são calculados pelas seguintes fórmulas:

$$a_0 = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{N\sum X^2 - (\sum X)^2} = -1,342$$

$$a_1 = \frac{N\sum(XY) - (\sum X)(\sum Y)}{N\sum X^2 - (\sum X)^2} = 1,863$$

As fórmulas acima foram aplicadas com os valores da Tabela Nº 23.

A reta de regressão dos mínimos quadrados dos valores

Tabela Nº 23. Determinação da reta de regressão de Log (SE) para Log (QE) e intervalos de confiança da estimativa

EVENTOS	QE (mm)	SE (t/Km ²)	X = LogQE	Y = LogSE	X ²	XY	Y ²	Y estimado	(X- \bar{X}) ²	INTERVALOS DE CONFIANÇA	
										Limite Superior	Limite Inferior
1 21-22-23/JUL	12,138	9,502	1,084	0,978	1,175	1,060	0,956	0,677	0,132	1,466	-0,112
2 23-24-25/JUL	4,218	1,040	0,625	0,017	0,391	0,011	0,000	-0,178	0,009	0,534	-0,890
3 14-15-16/AGO	8,006	1,069	0,903	0,029	0,815	0,026	0,001	0,340	0,033	1,067	-0,387
4 29-30-31/AGO	3,649	0,571	0,562	-0,243	0,316	-0,137	0,059	-0,295	0,025	0,427	-1,017
5 07-08-09/SET	1,857	0,202	0,269	-0,695	0,072	-0,187	0,483	-0,841	0,203	-0,011	-1,671
6 13-14-15/SET	4,437	0,446	0,647	-0,351	0,419	-0,227	0,123	-0,137	0,005	0,572	-0,846
7 03-04-05/NOV	8,918	2,234	0,950	0,349	0,903	0,371	0,122	0,428	0,053	1,169	-0,312
Σ	43,223	15,064	5,041	0,084	4,090	0,917	1,744		0,462		

de SE para QE \tilde{e} :

$$Y = -1,342 + 1,863 \cdot X$$

ou $\log SE = -1,342 + 1,863 \cdot \log QE$

A equação acima pode também ser escrita da seguinte forma:

$$SE \cdot QE^b = a$$

da qual, aplicando-se o logaritmo a ambos os termos, resulta:

$$\log SE + b \cdot \log QE = \log a$$

ou $\log SE = \log a - b \cdot \log QE$

onde: $\log a = a_0 = -1,342$

e $-b = a_1 = 1,863$

portanto:

$$a = \text{antilog} (-1,342) = 0,045$$

e $b = -1,863$

assim, a relação SE versus QE assume a seguinte forma:

$$SE \cdot QE^{-1,863} = 0,045$$

A adequação da relação admitida entre os valores de SE e QE \tilde{e} verificada através dos coeficientes de correlação e determinação.

O coeficiente de correlação \tilde{e} determinada pela seguinte fórmula (SPIEGEL, 1971).

$$r = \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[N \sum X^2 - (\sum X)^2] [N \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} = 0,958$$

onde: $Y = \log SE =$ logaritmo dos valores de sedimento e
fetivo mobilizado;

$X = \log QE =$ logaritmo dos valores de precipitação efetiva;

$N =$ número de pares de valores considerados.

O valor do coeficiente de correlação apresentado ($r = 0,958$) indica que a equação admitida na relação entre os valores de SE e QE se ajusta bem aos dados analisados, considerando-se que o coeficiente de correlação pode variar de -1 a $+1$, correspondendo estes limites ao ajuste perfeito.

O coeficiente de determinação é dado pelo quadrado do coeficiente de correlação, ou seja, $r^2 = 0,917$. Este coeficiente indica que 91,7% da variação total dos valores dos logaritmos de SE é explicada.

A reta de regressão dos mínimos quadrados dos valores de SE para QE possibilita a obtenção dos valores de sedimento efetivo mobilizado, com base no conhecido valor de precipitação efetiva para um dado evento pluvioso. Essa reta está graficada em papel log-lcg, na Figura Nº 30.

O intervalo de confiança da estimativa dos valores de logaritmos de SE com base nos logaritmos de QE, através da reta de regressão dos mínimos quadrados adotada, é determinado pela distribuição Student "t", conforme BOWKER & LIEBERMAN (1959):

$$Y_i \pm t_{N-2; \gamma} \cdot \sqrt{S^2 \left\{ 1 + \frac{1}{N} + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \right\}}$$

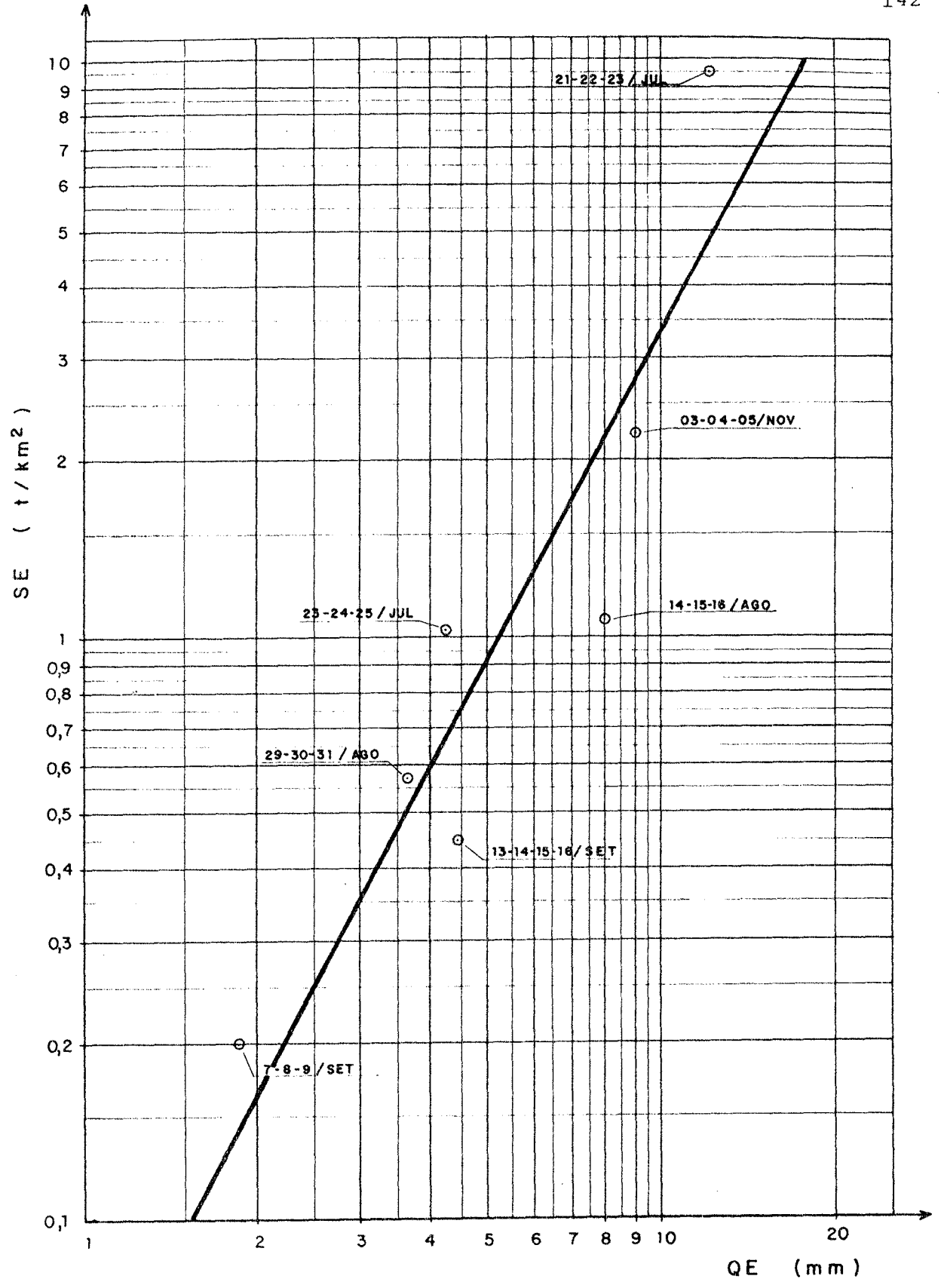


Figura Nº 30 .-

RETA DE REGRESSÃO
RELAÇÃO OE x SE

onde: Y_i = valores de log SE estimados pela equação dos mínimos quadrados;

$t_{N-2;\gamma}$ = distribuição student "t", com N-2 graus de liberdade e γ nível de significância;

s = desvio padrão da amostra;

X_i = valores dos logaritmos de QE observados;

\bar{X} = média aritmética dos logaritmos de QE;

N = número de amostras.

Na Tabela Nº 23 constam os valores dos limites superior e inferior de confiança, determinados pela equação acima, com os logaritmos de QE (X_i) observados e os seguintes valores:

$$T_{5;95\%} = 2,57$$

$$N = 7$$

$$Y_i = -1,342 + 1,863 X_i$$

A Figura Nº 31 mostra o intervalo de confiança superior e inferior da reta de regressão dos mínimos quadrados da estimativa dos logaritmos de SE para logaritmos de QE.

3.2.9. Amostras automáticas

A escassez de dados sedimentométricos e as dificuldades de sua obtenção em determinadas regiões, para a efetivação de estudos de previsão da descarga sólida em rios, mostram a necessidade de equipamentos específicos para a obtenção de dados adequados ao método a ser utilizado no estudo. Tais ins

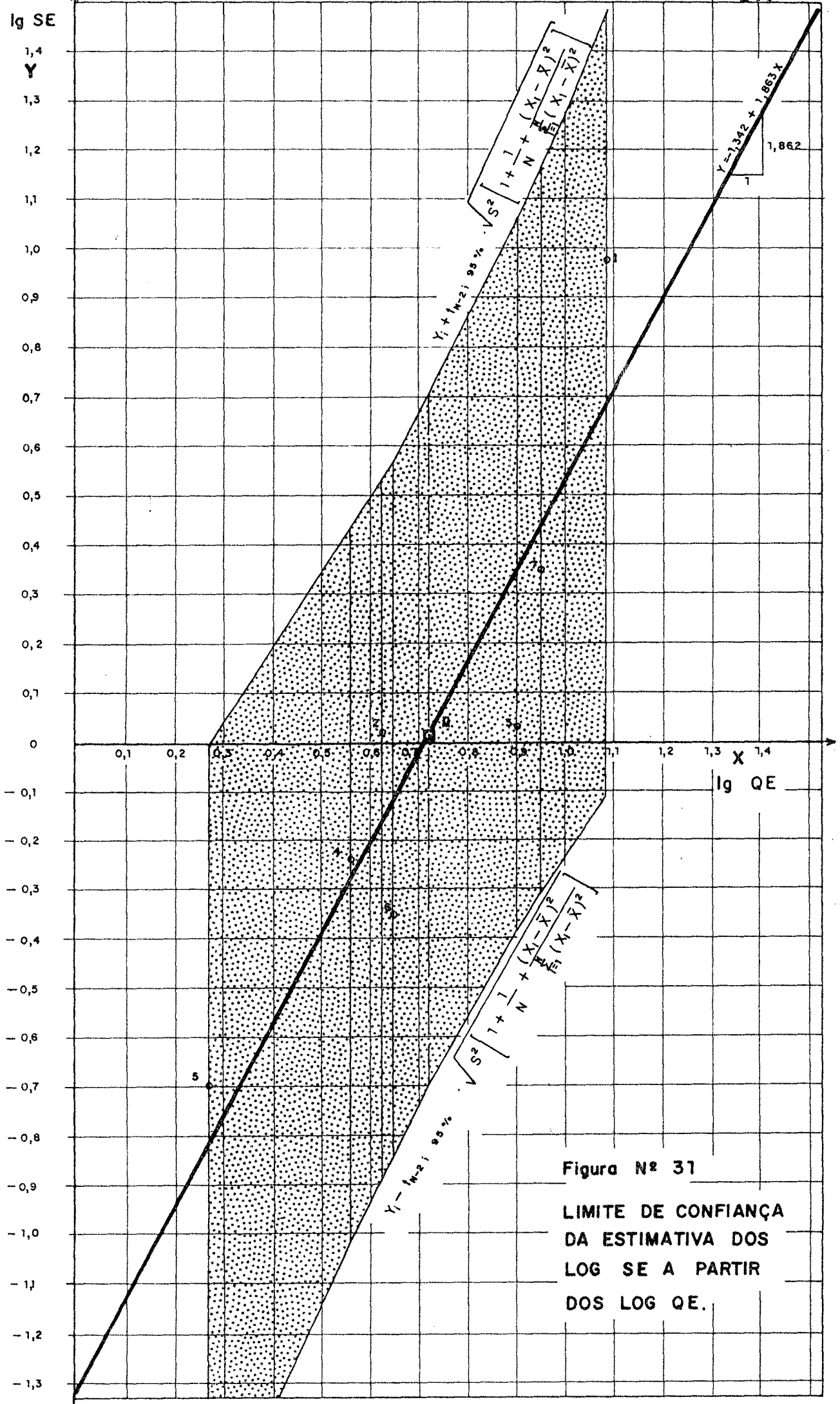


Figura Nº 31

LIMITE DE CONFIANÇA
DA ESTIMATIVA DOS
LOG SE A PARTIR
DOS LOG QE.

trumentos são representados por equipamentos automáticos de coleta de amostras que operam sem a assistência imediata do operador.

Um tipo particular de amostrador automático tem sido desenvolvido (KORNITZ, 1973; TASK COMMITTEE, 1969a; INTER-AGENCY COMMITTEE, 1961) como equipamento auxiliar na obtenção de amostras de sedimentos em suspensão, em rios de rápidas alterações de nível, particularmente em áreas remotas, onde não se dispõe dos serviços de um observador. Denominado "amostrador de nível fixo" (Single Stage Sampler), consiste de simples recipientes equipados com bocais de tomada de amostra e saída de ar. Coleta amostras de sedimentos em suspensão, automaticamente e sem necessidade de operador, quando o nível d'água se eleva a uma altura selecionada.

Neste trabalho, desenvolveram-se dois tipos de amostradores automáticos (ANA-78 e AND-78) para coletar amostras de sedimentos em suspensão, na elevação e na descida do nível d'água, respectivamente. Esses equipamentos coletam amostras em profundidades específicas, próxima à superfície da água, operando sob princípio de sifão.

Os equipamentos foram projetados com o objetivo de coletar amostras da mistura água-sedimento para a determinação da concentração de sedimentos em suspensão (deplúvio), tanto na subida como na descida do nível d'água no Posto-4 do Rio Forquetinha.

Esses equipamentos foram instalados nos pilares da ponte Bauer-Eck do Posto-4 e passaram a operar nas seguintes datas:

ANA-78: 18/julho/78

AND-78: 08/outubro/78.

A localização exata dos amostradores na secção transversal do rio não tem importância significativa visto que o deplúvio é considerado uniformemente distribuído com relação à vertical e lateral, na secção transversal, como observam NORDIN & RICHARDSON (1971). Os amostradores foram instalados nos pilares da ponte devido à posição central que ocupa no corrente, quando o nível d'água se eleva, e também pela facilidade encontrada para a fixação dos equipamentos. A Foto Nº 2 da Figura Nº 38 mostra os equipamentos instalados no Posto -4 do Rio Forquetinha.

3.2.9.1. Amostrador de Nível Ascendente (ANA-78)

O amostrador de nível ascendente (ANA-78) foi construído com base no amostrador "Single Stage Sampler", apresentado pelo Geological Survey (INTER-AGENCY COMMITTEE, 1961), e foi adaptado às condições verificadas no Posto-4 do Rio Forquetinha.

O ANA-78 coleta amostras de água e sedimento em 6 pontos fixos, na elevação do nível da água, e a uma profundida

de que varia entre 0 e 12 cm da superfície, conforme a velo
cidade local de tomada da mistura.

As Fotos Nº 4 e 5 da Figura Nº 38 mostram o amostrador ANA-78, instalado no pilar da ponte no Posto-4 do Rio Forquetinha.

Os detalhes técnicos do amostrador estão apresentados nas Figuras Nº 32 e 33 em desenho esquemático.

A Figura 32 mostra a parte do equipamento correspondente à tomada da amostra. O bocal de tomada é constituído de tubo de cobre com diâmetro interno de 3/16", enquanto o resto da tubulação é de plástico de mesmo diâmetro. Para evitar a entrada de materiais flutuantes da superfície da água, é adotada a forma de sifão, situando-se o bocal a 12 cm abaixo do seu ponto mais alto, tendo em vista as oscilações das ondas.

A Figura Nº 33 mostra a parte do equipamento correspondente à saída de ar, durante o enchimento das garrafas. A forma de sifão da tubulação e o posicionamento dos bocais de saída de ar em sentido contra-corrente, a 3 cm acima do sifão de tomada da amostra, são adotados com o objetivo de evitar a recirculação da mistura água e sedimento, através da garrafa, quando o equipamento estiver submerso.

A construção do equipamento, contendo 6 bocais de tomada, distanciadas entre si de 15 cm, deveu-se à análise da variação do nível da água, naquele posto, durante o ano de

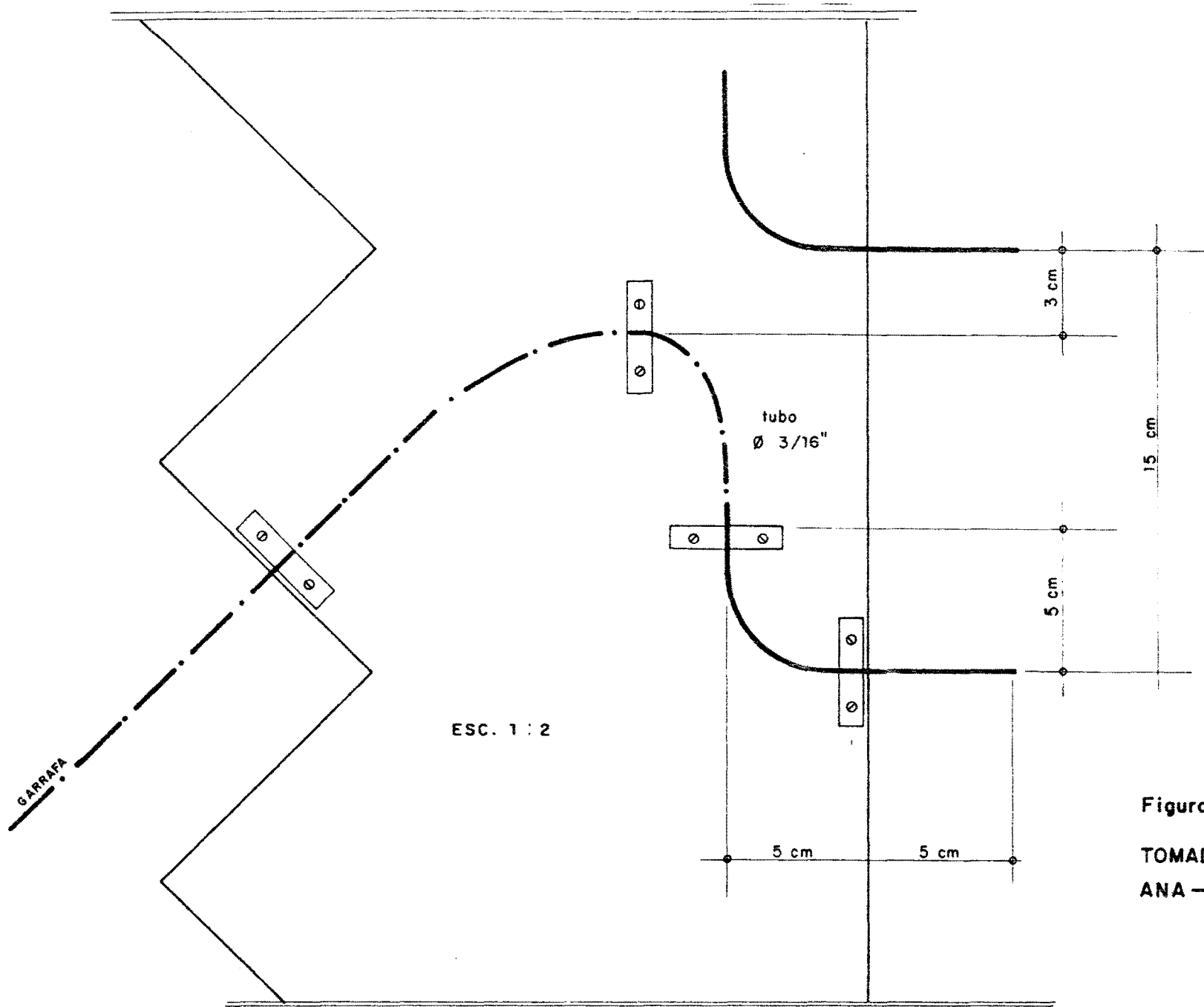
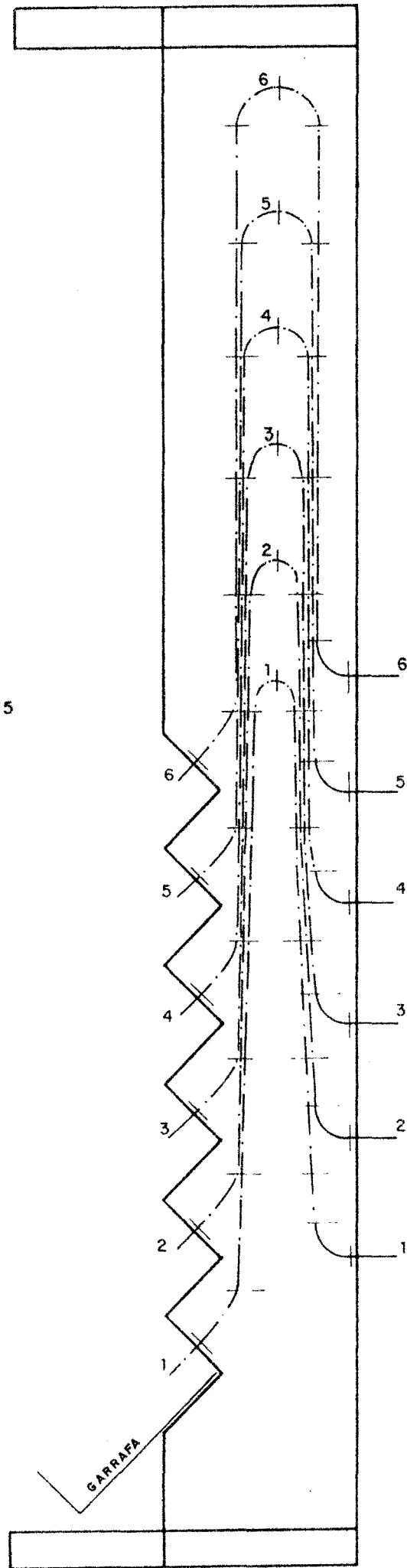


Figura N° 32 .-
TOMADA DE AMOSTRA
ANA-78

ESC. 1:75



Figuro Nº 33.-

SAIDA DE AR
ANA - 78

1977. Essa análise objetivou a obtenção de um número adequado de amostras para possibilitar o traçado de sedimentogramas mais próximos da realidade.

O ANA-78 pôde ser testado durante os eventos ocorridos nos períodos de:

20-21-22-23/julho/78

13-14-15-16/agosto/78

02-03-04-05/novembro/78

As amostras coletadas apresentaram os seguintes valores de concentração:

20-21-22-23/julho:

garrafa nº 1: 827,48 mg/l

garrafa nº 2: 601,32 mg/l

garrafa nº 3: 496,44 mg/l

garrafa nº 4: 871,47 mg/l

garrafa nº 5: 899,51 mg/l

garrafa nº 6: 1033,54 mg/l

13-14-15-16/agosto:

garrafa nº 1: 147,40 mg/l

garrafa nº 2: 120,90 mg/l

garrafa nº 3: 114,68 mg/l

02-03-04-05/novembro:

garrafa nº 1: 390,70 mg/l

garrafa nº 2: 403,12 mg/l

garrafa nº 3: 378,67 mg/l

As Figuras Nº 34, 35 e 36 mostram os gráficos correspondentes às variações do nível da água, da concentração de sedimentos em suspensão obtida no programa rotineiro e da variação da concentração, verificadas pelos amostradores automáticos, para os 3 eventos considerados.

As concentrações das amostras coletadas pelos amostradores automáticos, estão graficadas em faixas de variação, devido ao desconhecimento do momento exato das respectivas coletas.

Sabe-se, no entanto, que a coleta de mistura água-sedimento, por uma determinada garrafa, ocorre em algum tempo, quando o nível da água se eleva desde o nível do bocal de tomada, até o ponto mais alto do seu sifão.

O momento exato da coleta é função da velocidade da água no bocal de tomada, ou seja, da taquicarga. Entretanto, verifica-se que essa velocidade é muito variável devido às turbulências causadas pelo pilar de montante e pela própria natureza do rio.

O momento exato da coleta não pode ser determinado, portanto, adotou-se uma faixa de provável tempo de coleta, que corresponde à variação do nível da água entre o bocal e o ponto mais alto do sifão de tomada.

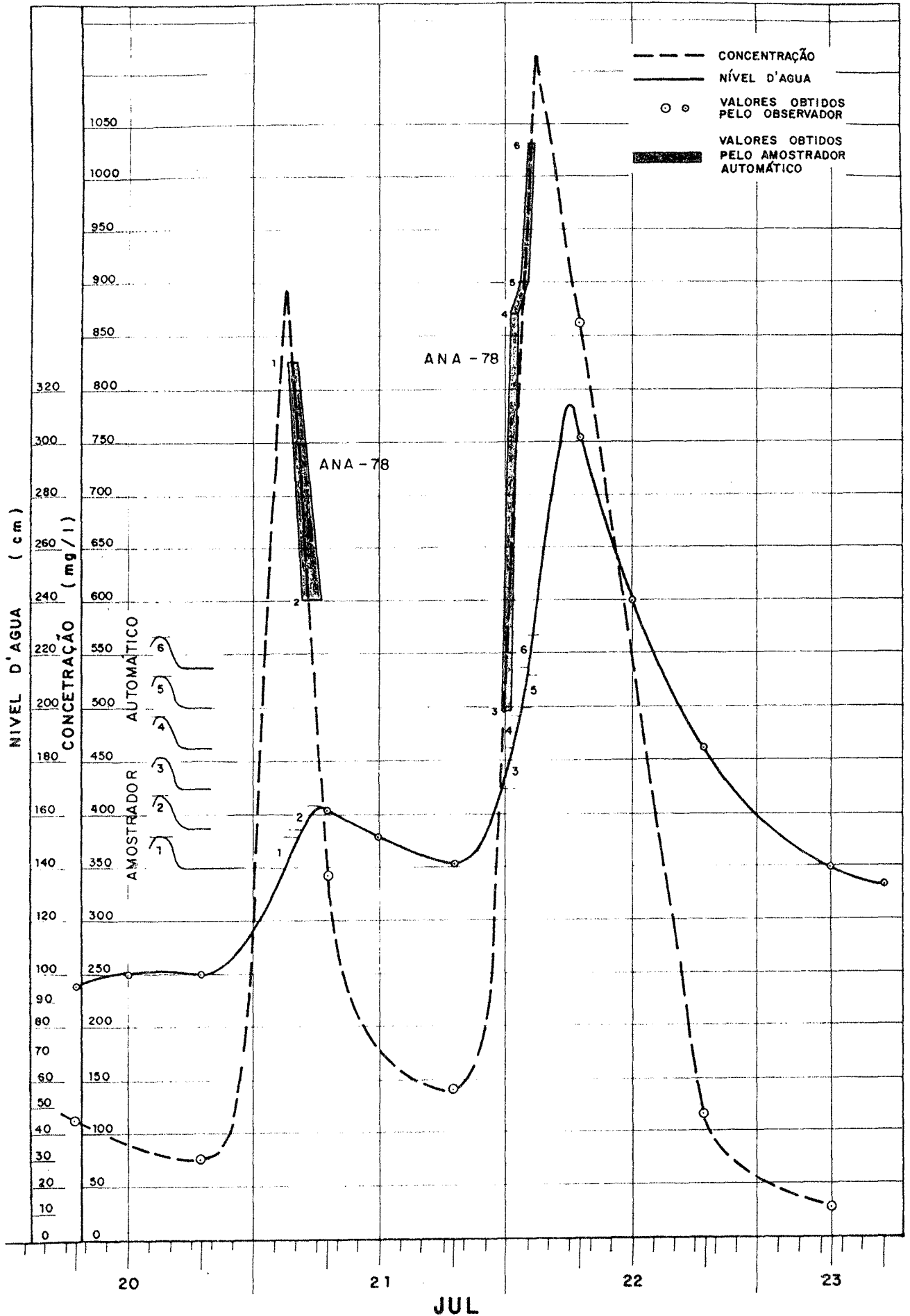


Figura Nº 34
 SEDIMENTOGRAMA DO ANA-78; 20, 21, 22, 23 / JUL / 78

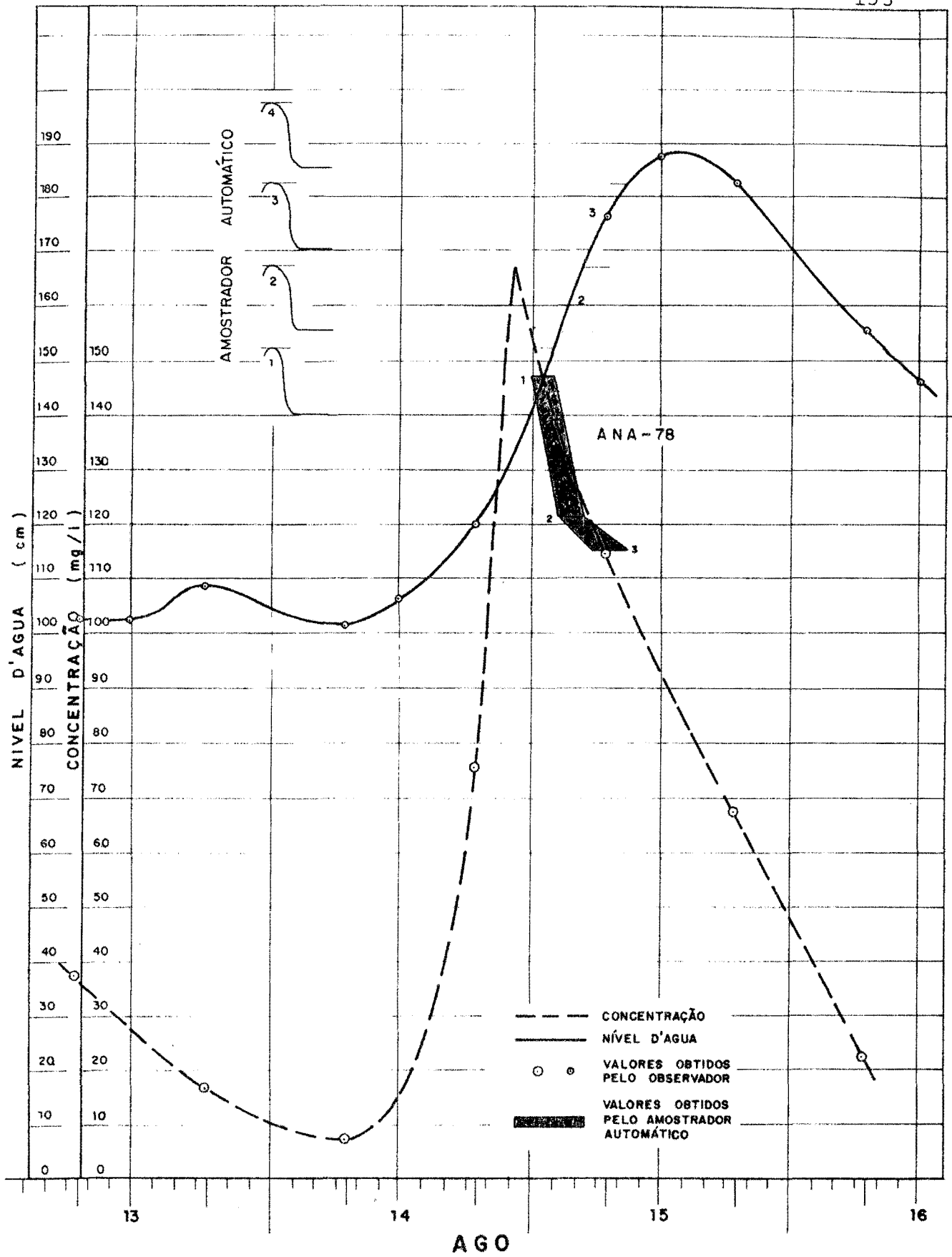


Figura N° 35 .-

SEDIMENTOGRAMA DO ANA - 78 , 14 , 15 , 16 / AGO / 78

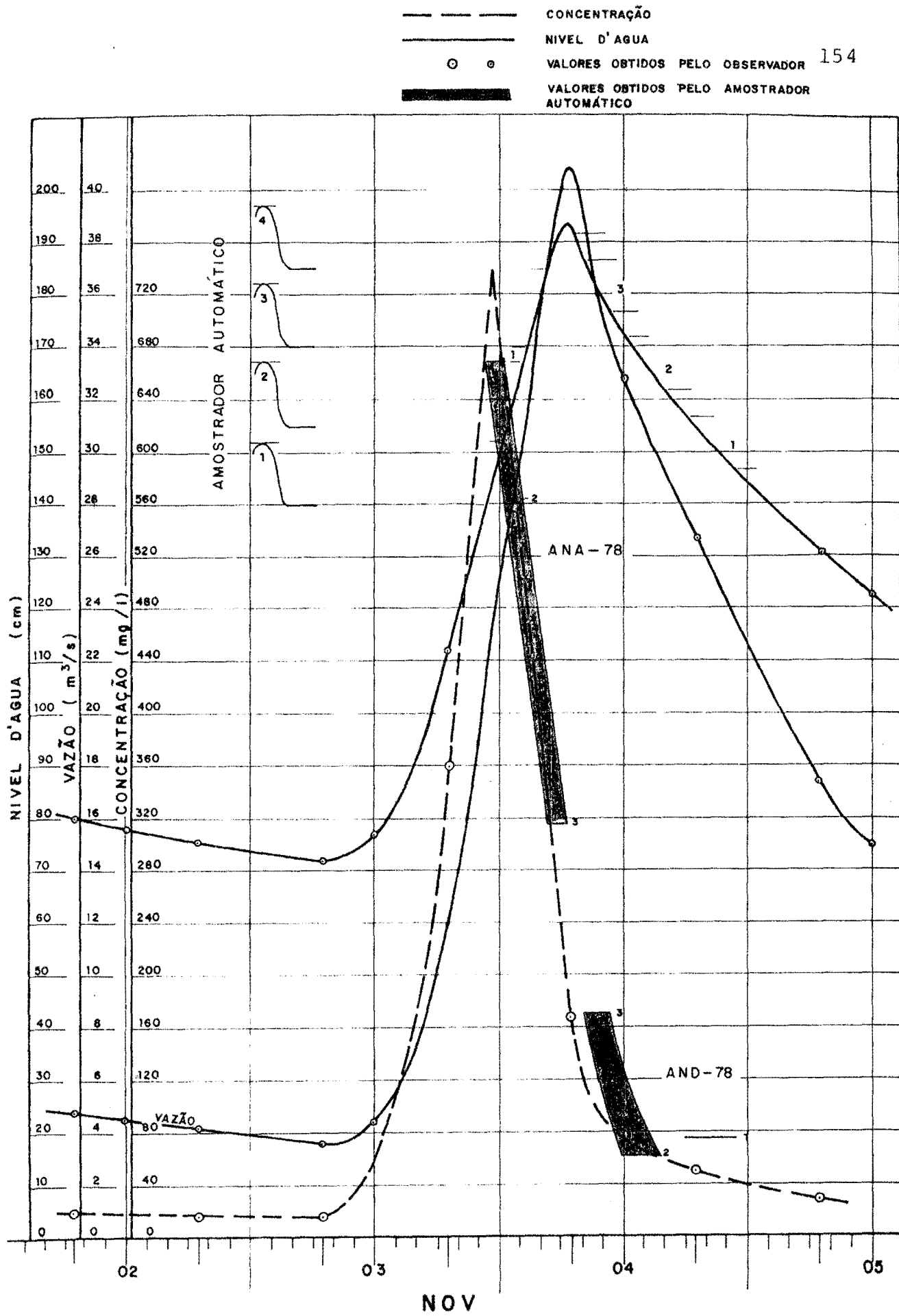


Figura N^o 36.-

SEDIMENTOGRAMA ANA-78 e AND-78, 03, 04, 05 / NOV / 78

3.2.9.2. Amostrador de Nível Descendente (AND-78)

O amostrador de nível descendente (AND-78) foi desenvolvido com o intuito de complementar os dados fornecidos pelo ANA-78, objetivando o conhecimento mais detalhado da variação da concentração de sedimentos em suspensão em períodos de cheia.

O AND-78 foi instalado no pilar de montante da ponte do Posto-4, no Rio Forquetinha, para coletar amostras de água - sedimento nos mesmos níveis fixados para o ANA-78, porém so mente na descida do nível da água.

O princípio do funcionamento do amostrador automático AND-78 tem por base a abertura do bocal de tomada de amostra em níveis pré-determinados, através de dispositivo que é a cionado por um sistema de roldanas e ligado a uma bóia, que indica as variações de nível da água. A Figura Nº 37 mostra o desenho esquemático do referido equipamento e as Fotos Nº 6, 7 e 8 da Figura Nº 38 mostram os detalhes construtivos.

As principais peças do amostrador estão indicadas na Fi gura Nº 37 e são as seguintes:

a) bocal de tomada de amostra, de cobre, com diâmetro interno 3/16";

b) tubo de borracha flexível de diâmetro interno 3/16", que permanece obstruído pelo dispositivo "c", sendo aberto

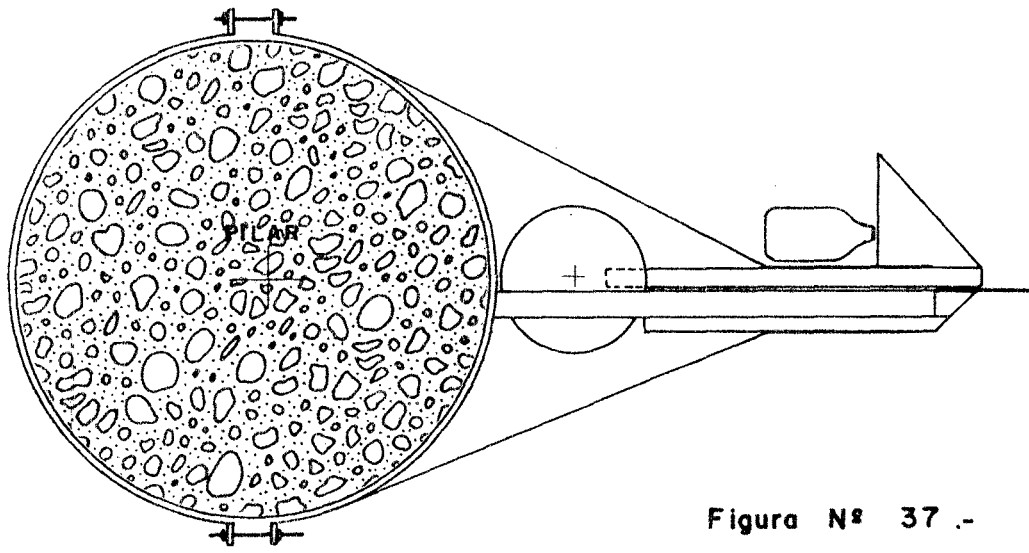
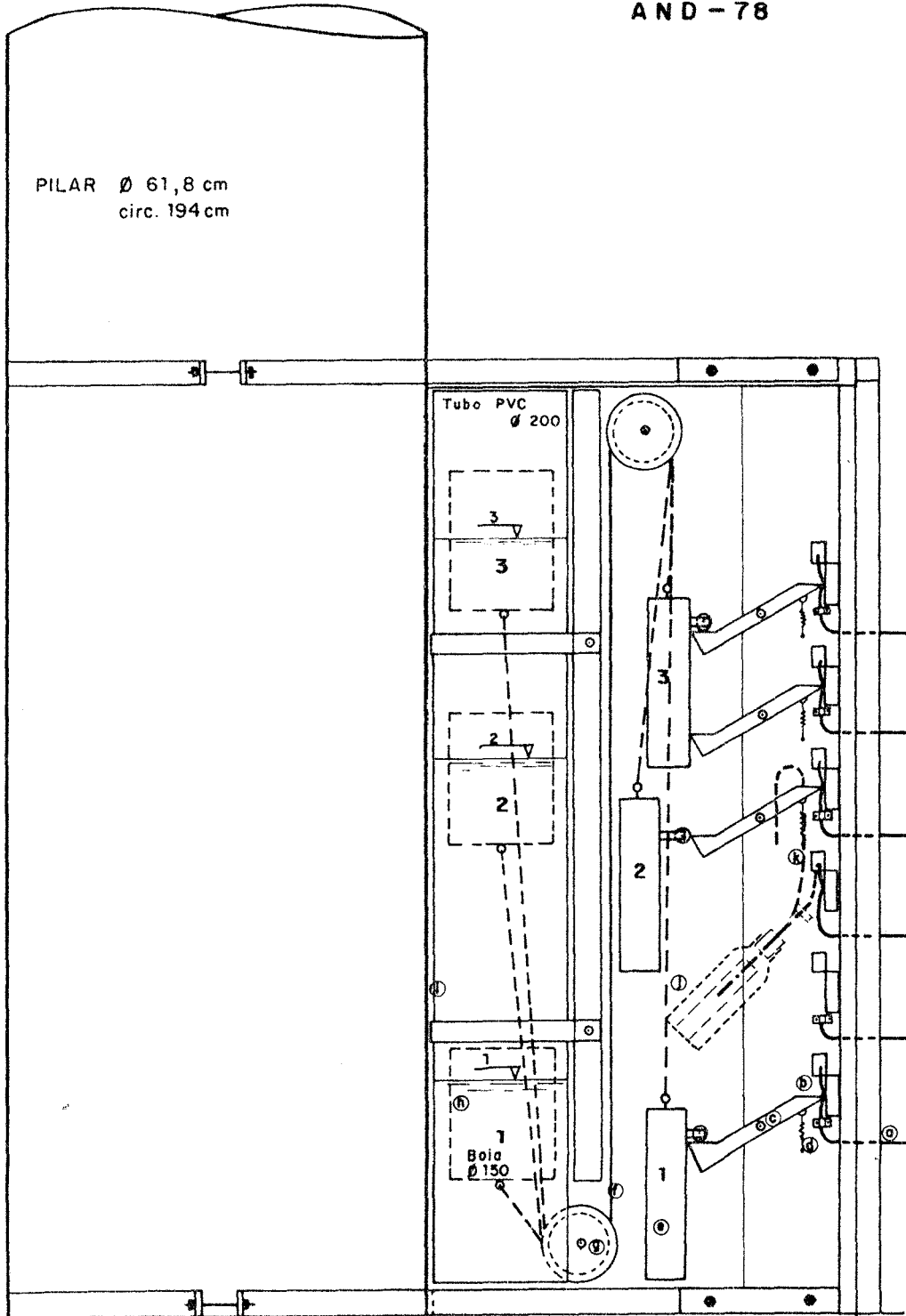


Figura Nº 37 .-

AND - 78



somente no momento da coleta;

c) dispositivo articulado para manter fechado o tubo de entrada da amostra;

d) mola que pressiona o dispositivo "c" contra o tubo "b";

e) peso que se movimenta conforme a bóia e serve para acionar o dispositivo "c", que desobstrui o tubo "b", para efetuar a coleta em níveis pré-fixados;

f) cabo de aço inoxidável, que une a bóia ao peso; seu comprimento é calibrado em laboratório para determinar os níveis de coleta;

g) sistema de roldanas que possibilita o movimento da bóia e do peso, no mesmo sentido;

h) bóia de plástico que transmite a variação do nível da água ao peso;

i) tubo de plástico que envolve a bóia, protegendo-a de oscilações provocadas pela turbulência do rio;

j) garrafa padrão para amostras;

k) tubo de saída de ar, disposto em forma de sifão, para evitar a circulação da mistura através da garrafa, caso o bocal de tomada a mantiver aberta, além do tempo necessário para a coleta.

O funcionamento do AND-78 pode ser descrito da seguinte forma:

Considerando-se, inicialmente, que o nível d'água este

ja na posição 1 (Figura Nº 37) os tubos de tomada de amostra mantêm-se fechados, através do dispositivo "c", pressionados pela mola "d". Com a gradual elevação do nível da água, a bôia instalada no interior do tubo se eleva sem sofrer qualuquer alteração provocada pela oscilação das ondas. O moviumento da bôia é transmitida, pelo sistema de roldanas, ao peuso, e este se eleva sem, no entanto, acionar o dispositivo de obstrução (posição 2). Assim, o nível da água pode eleuvar-se até atingir o seu pico. Uma vez atingido o pico, o níuvel da água inicia a descida gradativa e atinge, por exemplo, a posição 3. Nessa situação, o peso suportado pela bôia foruça o dispositivo "c" no sentido anti-horário, fazendo com que a mola se distenda e desobstrua o tubo de tomada de amostra, permitindo a entrada da mistura água-sedimento, através do sifão de entrada. Normalmente, a tomada de amostra permaneuce aberta por um período de tempo superior ao do enchimento da garrafa, devido à baixa velocidade de descida do nível da água. Porém a amostra obtida está protegida contra contamiunação por recirculação, pela forma sifonada do dispositivo de saída do ar. Com o gradual abaixamento do nível da água, o peso "e" se desprende do dispositivo "c", e este volta a obsutruir o tubo de tomada. Assim, acompanhando o abaixamento do nível d'água, o peso segue acionando os sucessivos dispousitivos, permitindo as coletas.

As amostras, uma vez colhidas, estão protegidas contra

contaminação, mesmo ocorrendo uma nova cheia.

O AND-78 coletou amostras de sedimentos em suspensão no evento ocorrido em 02-03-04-05/novembro, as quais apresentaram os seguintes valores de concentração:

garrafa nº 1: 347,63 mg/l

garrafa nº 2: 366,03 mg/l

garrafa nº 3: 358,88 mg/l

As concentrações verificadas pelas amostras obtidas pelo AND-78 estão graficadas na Figura Nº 36, juntamente com valores obtidos pela amostragem rotineira. Essas concentrações estão representadas em faixas, devido a incerteza quanto ao tempo exato da coleta, visto que a desobstrução do tubo de tomada ocorre lentamente.

Em vista disso, adotou-se como intervalo provável de coleta o espaço compreendido entre 5 cm acima e abaixo do ponto mais alto do sifão de tomada de amostra.

A observação entre os sedimentogramas de concentração de sedimentos em suspensão, definidos com base nos amostradores automáticos ANA-78 e AND-78, e os de amostragens rotineiras, torna evidente a adequação do uso desses equipamentos na determinação da forma mais precisa de sedimentogramas, em período de cheia.



Foto N° 1.- Operação do programa pe-
riódico de amostragem água-sedimento
Posto - 4 / Rio Forquetinha



Foto N° 2.- Equipamento automático de
coleta de mistura água-sedimento em opera-
ção durante uma cheia (ANA-78 e AND-78)



Foto N° 3.- Equipamento utiliza-
do pelo observador no programa
rotineiro de amostragem de mistu-
ra água-sedimento.



Foto N° 4.- Amostrador de Ní-
vel Ascendente (ANA-78) parte
da tomada de amostra.
Posto-4 / Rio Forquetinha

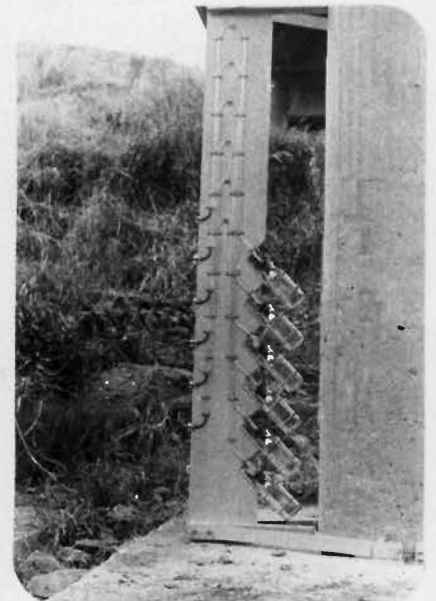


Foto N° 5.- Amostrador de Ní-
vel Ascendente (ANA-78) par-
te da saída de ar.
Posto - 4 / Rio Forquetinha

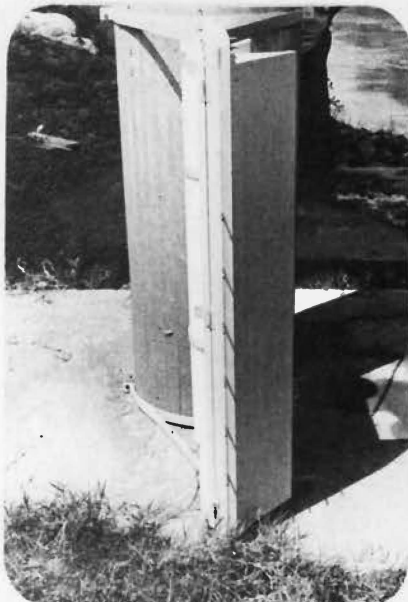


Foto N° 6.- Amostrador de
Nível Descendente (AND-78)
forma aerodinâmica.
Posto - 4 / Rio Forquetinha

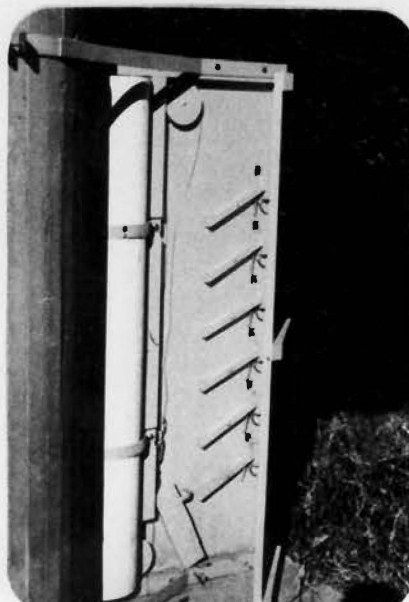


Foto N° 7.- Amostrador de Ní-
vel Descendente (AND-78) par-
te de tomada de amostra.
Posto - 4 / Rio Forquetinha

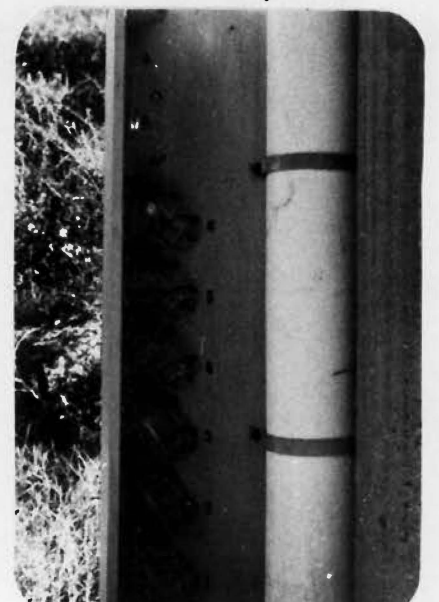


Foto N° 8.- Amostrador de Ní-
vel Descendente (AND-78) par-
te da saída de ar.
Posto - 4 / Rio Forquetinha

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos são frutos dos procedimentos pesquisados e desenvolvidos com o objetivo de estimar a quantidade de deplúvio e sua variação no tempo, em rios de áreas elevadas.

Com rios de "áreas elevadas", o autor refere-se àqueles que drenam pequenas bacias hidrográficas de área não plana, em cuja superfície encontram-se materiais finos, tais como silte, argila ou areia fina, e que apresentam o deplúvio como sedimentos transportados em suspensão.

A consideração de bacias hidrográficas pequenas teve o sentido de possibilitar a suposição da distribuição uniforme da precipitação sobre a área, pois o método do Sedimentograma Unitário para a estimativa de deplúvio, estudado neste trabalho, baseia-se nos princípios do Hidrograma Unitário que regem a uniformidade espacial da chuva. Não existem critérios que determinem o tamanho exato da bacia hidrográfica, entretanto, algumas sugestões são conhecidas:

LINSLEY-KOHLER-PAULHUS (1949) observaram a inadequação da aplicação do método do Hidrograma Unitário em bacias com mais de 2.500 Km². SEREBRENICK (1966) determina o limite superior da área em 7.000 Km². PINTO et alii (1976) aplicaram o método na bacia do Rio Capivari, de 1.050 Km². RENDON-HER

RERO (1974) estimou o deplúvio pelo método do Sedimentograma Unitário na bacia do Rio Bixler que tem 39 Km².

Por outro lado, a superfície da bacia hidrográfica deve ser constituída de solos contendo partículas de silte, argila ou areia fina. Isto se deve ao fato de que o deplúvio transportado como sedimento fluvial é originário das vertentes da bacia contribuinte, de onde é erodido e transportado por água de precipitação, e entra no curso de águas permanente, por influxo lateral. E a quantidade de deplúvio que atinge uma dada secção transversal de um rio depende da disponibilidade de partículas de solo para o transporte, na superfície da bacia hidrográfica.

Desta forma, a escolha de bacias hidrográficas para a aplicação do método do Sedimentograma Unitário, para a estimativa de deplúvio em rios de áreas elevadas, deve, para satisfazer os critérios acima mencionados, levar em consideração o bom senso do calculista.

A Bacia Hidrográfica do Rio Forquetinha, referenciada no Posto-4, foi escolhida para o desenvolvimento deste trabalho por apresentar características compatíveis com as condições acima propostas. É uma bacia de 310 Km², situada na borda do Planalto Brasileiro (veja características físicas no item 3.1).

Estudou-se o comportamento da variação dos sedimentos em suspensão no posto fluviométrico (Posto-4), durante o pe

ríodo entre 17 de julho e 17 de novembro de 1978. Durante esse período, desenvolveu-se um programa rotineiro de coleta da mistura água-sedimento, às 7 horas da manhã e às 19 horas, que, juntamente com dados pluviométricos e fluviométricos cedidos pelo grupo de trabalho de Pesquisa FINEP 01 (CHA-UFRGS), constituíram os dados básicos desta pesquisa.

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados obtidos em cada procedimento realizado neste trabalho, tendo em vista o objetivo final, inicialmente delineado.

4.1. Análise Granulométrica

A análise granulométrica efetuada neste trabalho visou o reconhecimento dos materiais constituintes do sistema fluvial (superfície da bacia hidrográfica, leito do rio principal e escoamento do rio principal), no sentido de determinar a origem dos sedimentos em suspensão que passam pela secção transversal da Bacia do Rio Forquetinha (Posto-4).

A Figura Nº 02 mostra as distribuições granulométricas dos materiais constituintes das vertentes da bacia hidrográfica, onde:

S1 - representa o solo Charrua, amostra coletada a aproximadamente 400 m de altitude;

S2 - representa o solo Ciríaco, amostra coletada a aproximadamente 100 m de altitude;

S3 - representa o colúvio verificado nas proximidades do Rio Forquetinha.

S1 e S2 são amostras constituídas da mistura de 3 amostras coletadas em diferentes pontos dentro da Bacia, aproximadamente à mesma altitude. As amostras foram obtidas a partir de uma profundidade aproximada de 5 cm da superfície do terreno, buscando-se com isso que fossem obtidas amostras, sem inclusão de material orgânico da superfície, representativas da superfície do solo, donde o material é erodido e transportado pela ação das precipitações e dos escoamentos superficiais.

As outras duas distribuições granulométricas constantes na Figura Nº 02, correspondem aos solos Ciríaco e Charrua, e foram transcritas do Levantamento do Reconhecimento de Solos do Estado do Rio Grande do Sul (BRASIL, 1973).

A pequena quantidade de amostras analisadas foi julgada suficiente para um reconhecimento dos materiais constituintes dos solos da superfície da bacia, com finalidade de efetuar uma comparação preliminar dos sedimentos constituintes do sistema fluvial.

A Figura Nº 03 mostra algumas distribuições granulométricas dos materiais do leito do Rio Forquetinha. Essas amostras foram coletadas do fundo do rio, a intervalos de distância aproximada de 1 Km, a partir do Posto-4, no sentido a montante. Com esse esquema de obtenção de amostras, buscou

-se conhecer a natureza dos sedimentos transportados pelo rio, na secção transversal do Posto-4, seguindo-se as recomendações da bibliografia especializada (EINSTEIN, 1964).

Durante as operações de coleta de amostras do leito do Rio Forquetinha, observou-se que ele é constituído de fundo rochoso, o que impossibilitou a obtenção de amostras em de terminados locais. Desta forma, as amostras foram coleta das em trechos onde a velocidade de escoamento das águas era relativamente menor, e portanto propícios à deposição de se dimentos no fundo do rio.

A Figura Nº 04 representa as distribuições granulométricas dos sedimentos transportados em suspensão, durante as cheias verificadas nos meses de julho e novembro de 1978, na secção transversal do Posto-4.

Devido ao fato de que é necessário obter-se uma quanti dade mínima de materiais para o processamento granulométrico em laboratório, e tendo sido pequena a quantidade de sedimen tos obtidos no campo, somente duas distribuições granulométricas são apresentadas. Entretanto, entendemos que elas são suficientes para comparar qualitativamente os sedimentos cons tituintes do sistema fluvial.

A observação das distribuições granulométricas da Figu ra Nº 02, mostra que as vertentes da bacia hidrográfica são constituídas por materiais resultantes da decomposição de ro chas, e apresentam diâmetros de cascalho, areia fina, silte

e argila. A distribuição granulométrica dos materiais do leito (Figura Nº 03) mostra que no leito do Rio Forquetinha é encontrado cascalho fluvial em grande quantidade (até 65%) , "areia grossa", pequena quantidade de material de diâmetro de areia fina, e menos de 1% de silte. Os sedimentos transportados em suspensão são constituídos em sua quase totalidade de silte e argila, compreendendo 97% a 100%, como pode ser observado na Figura Nº 04.

A análise granulométrica sugere que os sedimentos transportados em suspensão, através da secção transversal do Posto-4, no Rio Forquetinha, são provenientes das vertentes da bacia hidrográfica. Esses sedimentos, que foram erodidos e transportados pela ação das precipitações e escoamento superficial, constituem o deplúvio e se integram, em parte, no escoamento do Rio Forquetinha.

4.2. Dados para a aplicação do método do Sedimentograma Unitário

A análise granulométrica dos materiais constituintes do sistema fluvial e a observação de fluviogramas e sedimentogramas do Posto-4 mostram o predomínio do deplúvio como sedimentos transportados em suspensão pelo Rio Forquetinha. Observações em outros postos confirmam a validade dessa constatação para a Bacia do Rio Forquetinha.

Em vista disso, desenvolveu-se um procedimento de estimativa de deplúvio, denominado Sedimentograma Unitário, que pode produzir estimativas de razoável precisão, com base em observações feitas em períodos relativamente curtos.

O Sedimentograma Unitário foi obtido pela análise de 6 eventos de cheia ocorridos na Bacia do Rio Forquetinha durante o período compreendido entre 17 de julho e 17 de novembro de 1978.

Durante esse período foram coletados os dados referentes à precipitação, vazão e concentração de sedimentos em suspensão, os quais passaremos a apresentar.

4.2.1. Precipitação

O método do Sedimentograma Unitário supõe a precipitação uniformemente distribuída sobre a área da bacia, com intensidade constante, durante o período unitário.

Os dados de precipitação média sobre a bacia foram obtidos pela aplicação do método de Thiessen, considerando 5 postos pluviométricos distribuídos na bacia hidrográfica de 310 Km². A Figura Nº 05 mostra a localização dos pluviômetros e suas respectivas áreas de influência.

A densidade de distribuição dos pluviômetros na bacia, é razoável, considerando-se que a maior área de influência dos pluviômetros é de 95 Km², referente ao posto Pedras Bran

cas, abrangendo 30,65% da área da bacia.

As precipitações médias foram determinadas pelo método de Thiessen de 12 em 12 horas, tendo em vista que as leituras nos pluviômetros foram efetuadas 2 vezes ao dia, às 7 e às 19 horas. A Tabela Nº 04 mostra os valores calculados de precipitação média, os quais foram graficados no tempo na Figura Nº 09.

Tendo em vista a ordem de grandeza da bacia hidrográfica (310 Km²), o período unitário adequado para a aplicação dos princípios do Hidrograma Unitário é de 6 horas, conforme SHERMAN (1942). Desta forma, para o desenvolvimento do método do Sedimentograma Unitário, que se baseia naqueles princípios, deve-se adotar um período unitário de 6 horas. Em consequência os valores de precipitação média sobre a área da bacia deverão corresponder ao período unitário adotado, o que implica em obter leituras pluviométricas de 6 em 6 horas.

Sugerimos, para futuros trabalhos, a utilização de pluviógrafos em vez de pluviômetros, na obtenção de dados de precipitação, quando a área da bacia hidrográfica tiver a mesma ordem de grandeza da bacia considerada neste trabalho.

4.2.2. Vazão

Os dados fluviométricos obtidos para o trabalho correspondem às leituras linimétricas realizadas três vezes ao dia,

às 7, 12 e 19 horas, no Posto-4 do Rio Forquetinha. Estas foram transformadas em descargas através da curva-chave, cedido pelo CHA-UFRGS (Pesquisa FINEP-01).

Os valores das leituras linimétricas e os valores correspondentes de descarga constam na Tabela Nº 04. As descargas instantâneas estão graficadas em relação ao tempo na Figura Nº 09.

Tendo em vista a rapidez de elevação do nível d'água (aproximadamente 12 horas para atingir o pico, para uma chuva isolada de 6 horas, no Posto-4), sugere-se a utilização de linígrafos para a obtenção de dados fluviométricos mais precisos, em futuras aplicações do método do Sedimentograma Unitário.

4.2.3. Concentração de sedimentos em suspensão

Os valores de concentração de sedimentos em suspensão para este trabalho foram obtidos através do programa rotineiro de coleta de amostras de mistura água-sedimento (2 vezes ao dia: às 7 e 19 horas). O processamento dessas amostras em laboratório foi feito visando à determinação dos valores da concentração em mg/l.

Na Tabela Nº 04, constam os valores da concentração de sedimentos em suspensão verificados no Posto-4, durante o período entre 17 de julho e 17 de novembro de 1978. Esses valores

lores estão graficados em relação ao tempo na Figura Nº 09.

O programa rotineiro de coleta de amostras foi realizado por um observador local, que, utilizando-se de um amostrador de integração vertical, construído especialmente para este fim, coletou amostras de mistura água-sedimento, 2 vezes ao dia, às 7 e 19 horas, em uma vertical selecionada no Posto-4. A Foto Nº 3 da Figura Nº 38 mostra o equipamento utilizado no programa rotineiro de amostragem.

Um programa periódico de coleta de amostras de mistura água-sedimento foi realizado, com o objetivo de verificar a uniformidade de distribuição do deplúvio na secção transversal e a eficiência do equipamento utilizado pelo observador.

A Figura Nº 08 mostra as variações dos valores de concentração de sedimentos em suspensão em 3 verticais de secção transversal do Posto-4 e em 3 níveis diferentes de valores de concentração, verificados pelos amostradores US-D 49 e o utilizado no programa rotineiro.

A observação da Figura Nº 08 sugere que as diferenças verificadas nos valores de concentração ao longo da secção transversal, são devidas à natureza aleatória do transporte de sedimentos. Isto porque o leito do Rio Forquetinha, no Posto-4, é constituído de rochas, e os sedimentos transportados em suspensão apresentam granulometria menor que os encontrados ao longo do seu leito, como foi visto na análise granulométrica. Com base nessas constatações admite-se que a loca

lização exata da vertical de coleta de amostras de sedimentos em suspensão, quando estes são constituídos de deplúvio, não é de significativa importância.

A eficiência do equipamento utilizado pelo observador em relação ao equipamento US-D 49, foi verificada através de uma correlação estatística, com os valores obtidos no programa periódico de coleta de amostras.

A análise efetuada, constante no Anexo II, resultou em coeficiente de correlação $r = 0,974$ e coeficiente de determinação $r^2 = 0,949$, para a reta de regressão dos mínimos quadrados dos valores de concentração, obtidos pelo observador, para os valores obtidos pelo US-D 49. A reta de regressão dos mínimos quadrados está graficada na Figura Nº 45, no Anexo II.

Como o coeficiente de correlação mede o grau de ajustamento dos dados à equação linear admitida, cuja variação é de 0 a 1, e o coeficiente obtido é de $r = 0,974$, conclui-se que os dados se ajustam bem à equação considerada.

O coeficiente de determinação $r^2 = 0,949$ indica que 94,9 % da variação total dos valores de concentração, obtidos pelo observador, é explicada.

Esses dados sugerem que as variações verificadas nos valores de concentração de sedimentos em suspensão, obtidos pelo observador, participam da natureza aleatória do transporte de sedimentos (PORTERFIELD, 1972), independentemente da eficiência

cia do equipamento utilizado na coleta.

Como a determinação precisa da forma do sedimentograma de deplúvio de períodos de cheia é dependente da quantidade de amostras obtidas durante o evento, observou-se, para a Bacia do Rio Forquetinha, a necessidade de se executar um programa rotineiro de coleta de amostras, de 6 em 6 horas.

A realização de tal programa exigiria a permanência de um observador no local de coleta, encarecendo sobremaneira os custos dos trabalhos de campo, o que se justificaria somente em períodos de cheia.

Sentiu-se, em vista disso, a necessidade de se desenvolver um procedimento econômico de coleta de amostras de sedimentos em suspensão, para a determinação precisa de sedimentogramas de deplúvio em períodos de cheia.

4.3. Obtenção do Sedimentograma Unitário

O Sedimentograma Unitário foi desenvolvido tendo como unidade padrão 1 tonelada para uma precipitação com duração de 6 horas, uniformemente distribuída sobre a área da bacia, cuja representação é SU (1,6).

O SU (1,6) para a Bacia do Rio Forquetinha, foi determininado pelo confronto de Sedimentogramas Unitários, obtidos pela análise de 6 eventos de cheia ocorridos entre 17 de julho e 17 de novembro de 1978, no Posto-4 do Rio Forquetinha.

Os cálculos foram desenvolvidos de duas formas distintas, conforme o tipo de precipitação ocorrida:

- a) chuvas isoladas;
- b) chuvas complexas.

Os volumes de precipitação, escoamento superficial e de deplúvio produzidos em cada evento, assim como os coeficientes utilizados no desenvolvimento dos cálculos estão relacionados na Tabela Nº 12.

A análise de dois eventos selecionados como sendo chuvas isoladas, produziram os Sedimentogramas Unitários constantes nas Figuras Nº 12 e 13. Como se pode observar os Sedimentogramas Unitários obtidos de chuvas isoladas apresentaram formas muito semelhantes. Os cálculos desenvolvidos estão apresentados nas Tabelas Nº 12 e 13.

O período unitário adotado de 6 horas mostrou-se adequado à análise na Bacia do Rio Forquetinha. Por outro lado, verificou-se uma certa dificuldade na determinação precisa da forma dos hidrogramas e sedimentogramas para o desenvolvimento do método, em consequência das rápidas variações dos valores de descarga e concentração durante as cheias.

Sugere-se, portanto, que, em futuras aplicações do método do Sedimentograma Unitário, se adote um procedimento de campo mais adequado, utilizando-se pluviógrafos em vez de pluviômetros, linígrafo no lugar de régua linimétrica e maior número de dados sedimentométricos nas ocasiões de cheia.

O outro procedimento considerado na obtenção de Sedimentogramas Unitários refere-se a chuvas complexas. Esse procedimento foi aplicado a quatro eventos de cheia, conforme mostram as Tabelas Nº 13, 14, 15 e 16, resultando os Sedimentogramas Unitários graficados nas Figuras Nº 20, 21, 22 e 23.

A separação gráfica dos componentes dos sedimentogramas e hidrogramas, no caso de chuvas complexas, diferiu, no caso de chuvas isoladas, somente no que se refere à contribuição subterrânea do hidrograma. Tendo em vista a sutil queda da curva de depleção, adotou-se uma curva em forma de "S", para separar a contribuição subterrânea da contribuição por escoamento superficial nos hidrogramas de chuvas complexas. Os Hidrogramas Unitários, obtidos dessa forma, apresentaram-se mais consistentes.

Os Sedimentogramas Unitários para chuvas complexas foram obtidos pela processo de tentativas, por aproximações sucessivas, até atingir a convergência. Esses cálculos foram efetuados para valores médios de concentração em intervalo de 6 horas, adotado como período unitário.

As formas dos Sedimentogramas Unitários obtidos nos casos de chuvas complexas apresentam algumas diferenças entre si, as quais supõe-se que sejam devidas à separação inadequada dos componentes do sedimentograma e do hidrograma, à determinação não precisa da forma dos sedimentogramas e hidrogramas de cheia e a faltas inerentes aos princípios do método

do. Entretanto, com a consideração cuidadosa dessas falhas, o método pode constituir-se em um procedimento útil para a estimativa de deplúvio.

4.4. Verificação dos Sedimentogramas Unitários obtidos

Antes de efetuar-se o confronto dos Sedimentogramas Unitários obtidos em cada evento, para a adoção do Sedimentograma Unitário final, dois testes foram realizados.

O primeiro teste consistiu na verificação da unidade dos sedimentogramas obtidos.

Como o SU (1,6) corresponde a uma unidade padrão de 1 t sobre a área da bacia, a seguinte identidade deveria ser verificada:

$$(SU) \cdot \frac{t}{24} = \text{área da bacia}$$

Pois, sendo, as ordenadas do Sedimentograma Unitário, dadas em Km²/dia e multiplicando-se essas ordenadas pelo correspondente intervalo de tempo, o resultado será a área da bacia, em Km².

A Tabela nº 21 mostra esse teste, onde observa a perfeita identidade para os casos de chuvas isoladas, e valores próximos, nos casos de chuvas complexas. As diferenças verificadas nos Sedimentogramas Unitários de chuvas complexas devem-se aos fatos mencionados no item anterior, e podem ser

desprezadas, tendo em vista suas ordens de grandeza.

O segundo teste efetuado, refere-se nos tempos de duração dos eventos. Esse teste consiste na verificação da identidade entre o tempo de base do sedimentograma de cheia e o tempo de duração do Sedimentograma Unitário, mais a duração da precipitação, menos 1.

A Tabela nº 21 mostra a verificação desse teste para todos os eventos estudados.

Após esses testes, os Sedimentogramas Unitários obtidos foram considerados qualificados para a escolha do gráfico unitário final.

4.5. Escolha do Sedimentograma Unitário final

A escolha do Sedimentograma Unitário final, ou seja, do sedimentograma representativo das condições de produção de deplúvio na Bacia do Rio Forquetinha, durante o período entre 17 de julho e 17 de novembro de 1978, foi efetuada pela interpolação de um sedimentograma médio, a sentimento, de modo a traduzir o sedimentograma aparentemente mais provável e representativo, face aos resultados existentes.

Utilizou-se o método sugerido por LINSLEY- KOHLER - PAULHUS, (1949) para a determinação do Hidrograma Unitário final. Esse procedimento determina as coordenadas do pico médio pela média aritmética das alturas máximas atingidas pelos diversos

gráficos, e pela média aritmética dos tempos gastos para atingi-los. A Tabela nº 22 mostra a determinação do pico médio do Sedimentograma Unitário.

Com base no pico médio e no confronto dos Sedimentogramas Unitários obtidos, traçou-se, a sentimento, o Sedimentograma Unitário final para a Bacia do Rio Forquetinha, conforme mostra a Figura Nº 28.

O hidrograma Unitário final foi também obtido pelo procedimento acima descrito, conforme mostram a Tabela Nº 22 e Figura Nº 29.

4.6. Relação SE versus QE

O Sedimentograma Unitário obtido para a Bacia do Rio Forquetinha gera sedimentogramas de deplúvio, através da multiplicação de suas ordenadas (SU_i) pelo valor do sedimento efetivo mobilizado (SE), correspondente à precipitação considerada.

$$SU_i \cdot SE = SD_i$$

Pois, sendo SU_i dadas em Km^2/dia , e SE em t/Km^2 , SD_i resultará em descargas, em t/dia .

Uma relação foi desenvolvida entre os valores de sedimento efetivo mobilizado (SE) e da correspondente precipitação efetiva (QE), com base nos eventos considerados no estudo. Essa relação possibilita a aplicação do Sedimentograma

Unitário, pela determinação do valor do sedimento efetivo mobilizado (SE), uma vez conhecido o valor da precipitação efetiva (QE).

A Figura Nº 30 mostra a reta de regressão dos mínimos quadrados dos valores de SE para QE, cuja equação é a seguinte:

$$SE \cdot QE^{-1,863} = 0,045$$

O coeficiente de correlação $r = 0,958$ mostra que a equação admitida na relação entre os valores de SE e QE ajusta-se bem aos dados analisados.

O coeficiente de determinação $r^2 = 0,917$ indica que 91,7% da variação total dos valores dos logaritmos de SE é explicada pela variação dos logaritmos de QE.

O intervalo de confiança das estimativas dos valores de logaritmos de SE, com base nos logaritmos de QE, através da reta de regressão dos mínimos quadrados, foi definido pela distribuição Student "t".

Essa técnica é aplicada, para pequenas amostras (<30), na determinação dos limites de confiança superior e inferior, de estimativas efetuadas através da reta de regressão dos mínimos quadrados, conforme BOLKER & LIEBERMAN (1959). Os limites de confiança correspondentes ao valor médio das variáveis independentes (log QE) assumem o menor intervalo e aumentam gradativamente nos dois sentidos.

A Figura Nº 31 mostra o intervalo de confiança determi

nado com base nos valores observados de log QE. Esse intervalo refere-se à probabilidade de 95% de que os valores de log SE estimados com base nos valores de log QE, pela reta de regressão, esteja dentro daquele intervalo.

O intervalo de confiança da estimativa dos valores de log SE é uma determinante do limite da estimativa de deplúvio, através do método do Sedimentograma Unitário, visto que a utilização deste depende, diretamente, do valor de SE estimado da relação SE versus QE.

4.7. Exemplo de aplicação do Sedimentograma Unitário

O Sedimentograma Unitário SU (1,6), representativo das condições verificadas de produção de deplúvio na Bacia do Rio Forquetinha, durante o período entre 17 de julho e 17 de novembro de 1978, é aplicado ao evento ocorrido em 03-04-05/novembro/78 para a estimativa de seu sedimentograma de deplúvio. Esse evento não foi considerado na obtenção do Sedimentograma Unitário, o que permite a sua utilização no teste e exemplificação do método.

A precipitação média desse evento, corresponde a uma chuva isolada, com duração de 6 horas e altura de 43,63 mm, uniformemente distribuída sobre a área da bacia.

Essa média foi obtida pelo método de Thiessen, a partir das alturas pluviométricas observadas às 19 horas do dia 03

de novembro de 1978, nos 4 postos pluviométricos, as quais a apresentaram os seguintes valores:

- Alto Araguari = 39,4 mm
- Morro Gaúcho = 52,4 mm
- Alta Forquetinha = 40,7 mm
- Pedras Brancas = 41,0 mm

A Figura Nº 39 mostra o hidrograma e o sedimentograma correspondentes ao evento de 03-04-05/novembro, traçados com base nas leituras linimétricas e programa rotineiro de amostragem, respectivamente. Na mesma figura, a precipitação média é graficada, com duração correspondendo ao período unitário de 6 horas.

O procedimento utilizado na separação gráfica dos componentes do hidrograma e do sedimentograma foi o mesmo descrito no item 2 da secção 3.2.5.1., para o caso de chuvas isoladas.

A Tabela Nº 24 mostra os cálculos das descargas de água de escoamento superficial (QD_i) e descargas de deplúvio (SD_i), de 2 em 2 horas, com base no hidrograma e sedimentograma graficados na Figura Nº 39.

Os volumes de precipitação, de escoamento superficial e de deplúvio produzidos no evento estão relacionados na Tabela Nº 12, assim como os seus coeficientes correspondentes.

A precipitação efetiva foi determinada através do hidrograma observado, pela consideração do seu escoamento super

Tabela Nº 24. Cálculo de QD e SD - Chuvas complexas (03-04-05/NOV/1978)

TEMPO (dia/hora)	QT (m ³ /s)	QB (m ³ /s)	QD (m ³ /s)	CT (mg/l)	CB (mg/l)	ST (t/d)	SB (t/d)	SD (t/d)
03/								
14	4,00	3,20	0,80	22,00	12,00	7,60	3,32	4,28
16	6,00	3,10	2,90	150,00	12,00	77,76	3,21	74,55
18	9,50	3,05	6,45	283,00	11,00	232,29	2,90	229,39
20	14,70	3,00	11,70	390,00	11,00	495,33	2,85	492,48
22	23,70	2,90	20,80	420,00	10,00	860,03	2,51	857,52
24	36,50	2,80	33,70	420,00	10,00	1324,51	2,42	1322,09
04/								
02	42,60	2,70	39,90	395,00	10,00	1453,85	2,33	1451,52
04	44,20	2,60	41,60	340,00	10,00	1298,42	2,25	1296,17
06	42,50	3,70	38,80	242,00	11,00	888,62	3,52	885,10
08	39,00	5,00	34,00	135,00	12,00	454,90	5,18	449,72
10	35,50	6,00	29,50	105,00	14,00	322,06	7,26	314,80
12	33,00	7,30	25,70	90,00	16,00	256,61	10,09	246,52
14	31,00	8,50	22,50	75,00	17,00	200,88	12,48	188,40
16	29,00	9,60	19,40	65,00	19,00	162,86	15,76	147,10
18	27,20	10,80	16,40	55,00	21,00	129,25	19,60	109,65
20	25,50	12,00	13,50	49,00	22,00	107,96	22,81	85,15
22	23,85	13,20	10,65	45,00	24,00	92,73	27,37	65,36
24	22,25	14,40	7,85	42,00	27,00	80,74	33,59	47,15
05/								
02	20,80	15,60	5,20	39,00	30,00	70,09	40,44	29,65
04	19,40	16,80	2,60	36,00	32,00	60,34	46,45	13,89
06	18,00	18,00	0	35,00	35,00	54,43	54,43	0
Σ			383,95					8310,49

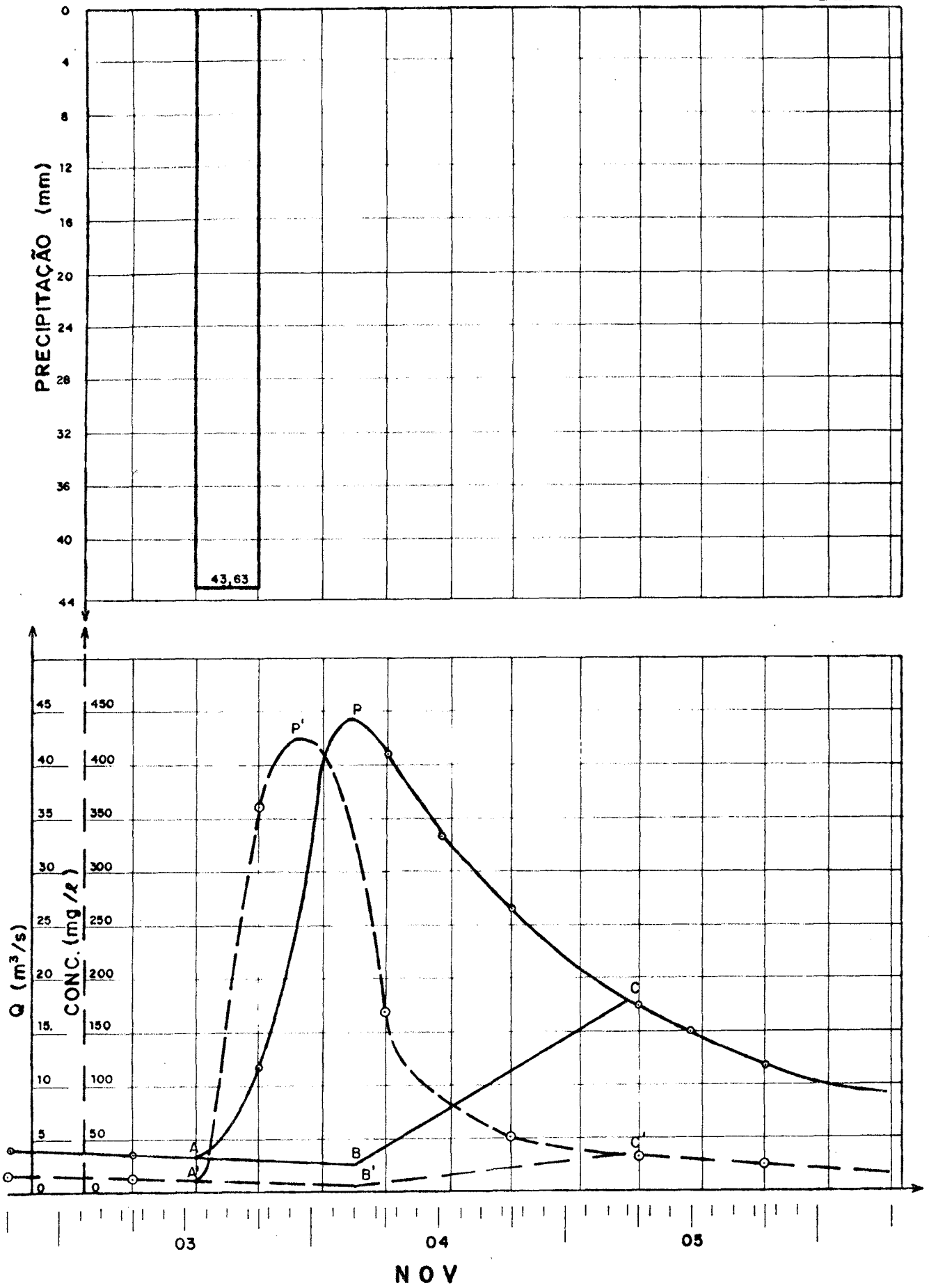


Figura N^o 39 .-

HIDROGRAMA E SEDIMENTOGRAMA
 CHUVA ISOLADA, 03, 04, 05 / NOV / 78

ficial, resultando no seguinte valor: $QE = 8,918 \text{ mm}$.

Partindo do valor conhecido de precipitação efetiva, utilizou-se a Figura Nº 40 para a estimativa do sedimentograma de deplúvio.

O valor do sedimento efetivo mobilizado (SE), obtido da relação SE versus QE, resultou em $SE = 2,652 \text{ t/Km}^2$.

O Sedimentograma Unitário SU (1,6) é aplicado ao evento na geração do sedimentograma de deplúvio, multiplicando-se as suas ordenadas (SU_i) pelo sedimento efetivo mobilizado (SE), ou seja:

$$SU_i \cdot SE = SD_i$$

onde: SU_i = ordenadas do Sedimentograma Unitário, em Km^2 /dia;

SE = sedimento efetivo mobilizado, em t/Km^2 ;

SD_i = ordenadas do sedimentograma de deplúvio estimado, em t/dia .

A Tabela Nº 25 mostra o cálculo das ordenadas do sedimentograma de deplúvio, com base no Sedimentograma Unitário SU (1,6) desenvolvido neste trabalho e constante na Figura Nº 40.

Para efeito de comparação, o sedimentograma de deplúvio, definido com base nos valores observados, está graficado, juntamente com o sedimentograma estimado através do SU (1,6), na Figura Nº 41.

A forma do sedimentograma estimado mostrou-se semelhan

Tabela Nº 25. Cálculo das ordenadas do sedimentograma
Evento - 03-04-05/NOV/1978

SDi = SUi.SE			SE = 2,652 t/Km ²
TEMPO (h)	SUi (Km ² /d)	SDi (t/d)	
0	0	0	
2	20	53,04	
4	60	159,12	
6	120	318,24	
8	210	556,92	
10	360	954,72	
12	480	1276,96	
14	540	1432,08	
16	540	1432,08	
18	410	1087,32	
20	270	716,04	
22	200	530,40	
24	150	397,80	
26	120	318,24	
28	80	212,16	
30	50	132,60	
32	30	79,56	
34	20	53,04	
36	10	26,52	
38	5	13,26	
40	0	0	

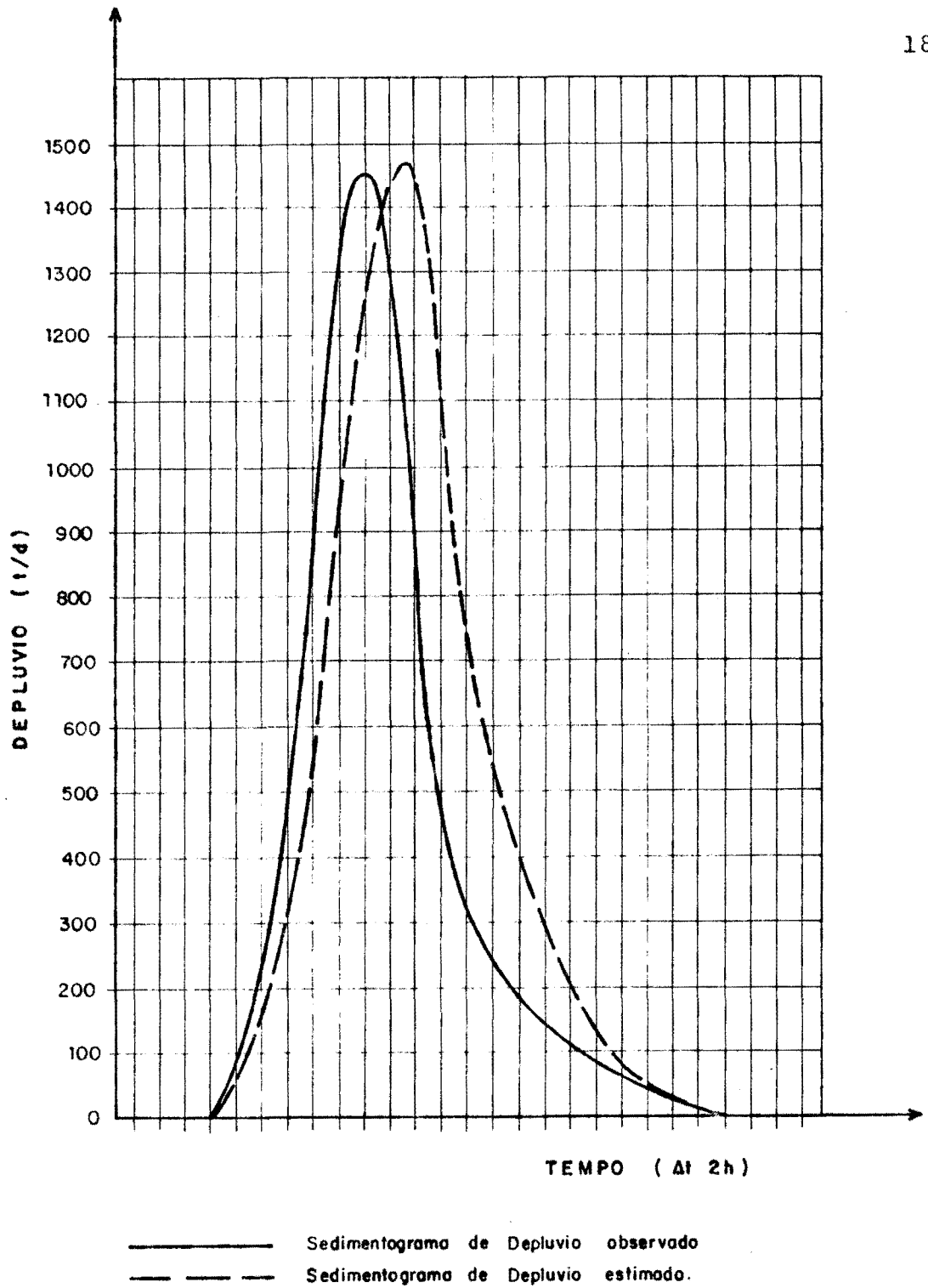


Figura Nº 41 .-
APLICAÇÃO DO SU(1,6)
AO EVENTO 03-04-05/NOV/78

te ao do observado, com ambos os picos apresentando valores quase coincidentes, porém com uma defasagem de tempo de 3 horas.

Essa defasagem do pico do sedimentograma estimado é esperada para eventos de chuvas isoladas, tendo em vista que na escolha do Sedimentograma Unitário final, ela era evidente (veja Figura Nº 28).

Em termos quantitativos, o deplúvio produzido no evento foi calculado, com base nos valores obtidos pela amostragem rotineira, em 692,54 t; e estimado pelo SU (1,6) em 812,51 t.

O erro de estimativa é de + 17,32% que permite considerá-la uma boa estimativa, tendo em vista a ordem de grandeza dos erros a que estão sujeitos os métodos estabelecidos para a estimativa de produção de sedimentos.

Sugere-se, aqui, que em futuros empregos do método de Sedimentograma Unitário, o estabelecimento e aplicação do gráfico de Sedimentograma Unitário, sejam feitas por uma única pessoa. Isso pelo fato de que a escolha do gráfico final, a separação dos componentes do sedimentograma e hidrograma, a consideração dos coeficientes, etc. são feitas de modo pessoal, com base no bom senso do calculista.

4.8. Amostradores Automáticos

O método de Sedimentograma Unitário requer, para o seu

desenvolvimento, o conhecimento das variações da descarga de sedimentos em suspensão, ocorridos durante um determinado intervalo de tempo de observação, na secção transversal do rio.

Os rios que apresentam, como predominante, a ocorrência de deplúvio como sedimentos em suspensão, e, portanto, aqueles que são passíveis de aplicação do método do Sedimentograma Unitário, mostram, geralmente, rápidas alterações nos valores de concentração de sedimentos em suspensão, em períodos de cheia.

A quantidade de amostras obtidas em programas rotineiros de coleta, normalmente adotadas, mostra-se insuficiente para a determinação precisa da forma dos sedimentogramas em períodos de cheia.

Em vista desse problema, desenvolveram-se, neste trabalho, dois equipamentos de obtenção de amostras de sedimentos em suspensão em rios de áreas elevadas, objetivando a determinação precisa da forma do sedimentograma em períodos de cheia.

Esses equipamentos consistem em recipientes equipados com bocais de tomada de amostra e saída de ar, dispostos em profundidades específicas, coletam amostras da mistura água-sedimento, próximas à superfície da água, operando sob o princípio de sifão.

A representatividade das amostras coletadas por esses equipamentos depende da uniformidade da distribuição dos se

dimentos em suspensão na secção transversal do rio. Dessa forma, os equipamentos são adequados para a obtenção de amostras constituídas de deplúvio.

Os equipamentos desenvolvidos são os seguintes:

- ANA-78 e

- AND-78.

Amostrador de nível ascendente (ANA-78)

O amostrador de nível ascendente (ANA-78) foi construído com base no equipamento "single stage sampler", para coletar amostras da mistura água-sedimento, à profundidades específicas, durante a elevação do nível da água nas cheias.

Os aspectos construtivos do equipamento foram baseados nos modelos desenvolvidos pelo Geological Survey (INTER-AGENCY COMMITTEE, 1961) que apresentaram resultados satisfatórios, e foram adaptados às condições encontradas no Rio Forquethina.

Os valores de concentração de sedimentos em suspensão obtidos pelo modelo ANA-78 estão graficados nas Figuras Nº 34, 35 e 36, juntamente com valores obtidos no programa rotineiro de coleta e da variação do nível da água.

As concentrações obtidas pelo modelo ANA-78 mostram-se bastante coerentes, quando comparados com os sedimentogramas definidos pelo programa rotineiro de coleta. Pequenas variações são verificadas, como é o caso da amostra Nº 4 do evento de 20-21-22-23/julho e amostra Nº 2 do evento 13-14-15-16

/agosto (vide Figuras Nº 34 e 35). Entretanto, supõe-se que essas variações sejam devidas às flutuações normais verificadas no transporte de sedimentos descritas por PORTERFIELD (1972).

Amostrador de nível descendente (AND-78)

O amostrador de nível descendente (AND-78) foi idealizado com base no amostrador ANA-78 e no aproveitamento das variações do nível da água. Esse equipamento coleta amostras da mistura de água-sedimento, a profundidades específicas, durante o abaixamento do nível da água nas cheias.

O AND-78 foi projetado de tal forma, que o seu funcionamento é comandado exclusivamente pelo curso da água. As coletas são realizadas automaticamente, através de dispositivos que são acionados em níveis pré-determinados. A variação do nível da água que é transmitida, por uma bóia e um sistema de roldanas, àqueles dispositivos.

Devido ao tardio início de operação do AND-78 no Posto -4 do Rio Forquetinha, somente um evento de cheia pode ser registrado por esse equipamento.

Os valores de concentração de sedimentos em suspensão obtidos pelo equipamento AND-78, e os valores obtidos em programa rotineiro de coleta se encontram graficados na Figura Nº 36.

A observação daquele gráfico mostra que os valores de concentração obtidos pelo modelo AND-78 são, de modo geral,

semelhantes aos valores determinados pelo programa rotineiro de coleta.

A amostra nº 1 apresentou um valor de concentração maior que a amostra nº 2 (veja Figura Nº 36). Essa variação pode ter sido causada pela contaminação da amostra, pela formação de um depositado no bocal de tomada antes do enchimento do recipiente.

A variação nos valores de concentração, devida à contaminação do bocal de tomada antes do enchimento do recipiente, pode ser desprezada para altos valores de concentração. Isto porque, aquela variação se confunde com as flutuações aleatórias normais verificadas no transporte de sedimentos. Entretanto, para valores baixos de concentração, as variações tornam-se evidentes, como é o caso da amostra nº 1.

A consideração das concentrações como altas ou baixas e a aceitabilidade dos dados obtidos pelos diferentes equipamentos, são de julgamento do calculista, que deve utilizar o seu bom senso e conhecimento sobre o transporte de sedimentos na secção considerada.

Com base nas primeiras amostras coletadas pelos dois equipamentos automáticos e, considerando que eles continuam sendo testados e aprimorados, são oportunas adiantar-se as seguintes sugestões:

a) para evitar-se a contaminação das amostras, pela inclusão de sedimentos depositados nos bocais de tomada, antes

das respectivas coletas, sugere-se que seja diminuído o comprimento do trecho horizontal do bocal e que se dê uma pequena inclinação no bocal de tomada da amostra;

b) deve-se manter um programa de manutenção dos equipamentos, verificando-se principalmente as condições dos bocais, e providenciando uma aplicação periódica de inseticida na proximidade deles, para evitar a sua obstrução pelos insetos; também as condições dos tubos de borracha que se deterioram rapidamente quando expostos ao sol devem ser observadas;

c) para evitar a danificação do equipamento pelos detritos arrastados pela onda de cheia, deve-se colocar um protetor a montante nos bocais;

d) para o Posto-4 do Rio Forquetinha, é conveniente aumentar-se a quantidade de bocais nos dois equipamentos: 6 para cima e 2 para baixo, mantendo-se a mesma distância entre eles, para cobrir as variações do nível d'água que se verificam com frequência;

e) os amostradores ANA-78 e AND-78 são equipamentos altamente úteis na obtenção de amostras de sedimentos em suspensão quando estes são formados de deplúvio. A utilização desses equipamentos constitui procedimento de campo adequado para a determinação da forma do sedimentograma, em períodos de cheia, para o desenvolvimento de Sedimentograma Unitário;

f) Os dois equipamentos podem ser adaptados a qualquer

rio que apresente a forma paralela entre o hidrograma e o se
dimentograma de deplúvio, variando a distância entre os bo
cais, conforme a amplitude de variação do nível da água.

5. CONCLUSÕES

As pesquisas sobre um procedimento de estimativa quantitativa do deplúvio em rios de áreas elevadas e sobre equipamentos para a coleta de amostras de mistura água-sedimento, realizadas e aplicadas na Bacia do Rio Forquetinha, durante o período compreendido entre 17 de julho e 17 de novembro de 1978, permitem o estabelecimento das conclusões que seguem.

- Do reconhecimento *in situ* da Bacia do Rio Forquetinha, das análises granulométricas dos sedimentos constituintes do sistema fluvial do Rio Forquetinha e da análise do comportamento das formas dos sedimentogramas em relação aos hidrogramas observados na secção transversal do Posto-4, conclui-se que:

1) Na secção transversal do Posto-4 do Rio Forquetinha, os sedimentos transportados em suspensão são predominantemente constituídos de deplúvio.

- Da aplicação, como exemplo, do método de Sedimentograma Unitário ao evento teste (Nov/78), conclui-se que:

2) A quantidade total de deplúvio estimado é de 812,51 t e a quantidade total de deplúvio observado é de 692,54 t. Isto corresponde a erro de estimativa de + 17,32%, que, em termos de procedimentos conhecidos de estimativa de sedimentos, representa uma melhora sensível. Além da estimativa quantitativa, o método fornece a variação, no tempo, da des

carga de deplúvio. A Figura Nº 41 mostra essa estimativa, onde se observa a forma bastante próxima do sedimentograma estimado ao sedimentograma observado.

- Do resultado da aplicação do Sedimentograma Unitário SU (1,6), construído com base nos eventos de cheia selecionados durante o período deste estudo (Figura Nº 40), ao evento ocorrido em 03.04.05/Nov/78, na Bacia do Rio Forquetinha, conclui-se que:

3) O método do Sedimentograma Unitário pode ser aplicado para estimar a quantidade de deplúvio e sua variação no tempo, em rios de áreas elevadas, partindo de um valor conhecido de precipitação efetiva sobre a área da bacia hidrográfica. O limite de aplicabilidade do método é determinado pelo intervalo de confiança da estimativa do sedimento efetivo mobilizado (SE), da relação SE versus QE, e pelo bom senso do calculista na suposição de validade dos princípios do método, para a bacia considerada.

- Face aos primeiros resultados obtidos das amostras coletadas pelos equipamentos automáticos pesquisados neste trabalho, e considerando-se que estes continuam sendo testados e aprimorados na Bacia do Rio Forquetinha, pode-se antecipar a seguinte conclusão:

4) O Amostrador de Nível Ascendente (ANA-78) e o Amostrador de Nível Descendente (AND-78) são equipamentos adequados para a obtenção de amostras de mistura água-sedimento,

em rios que apresentam o deplúvio como sedimentos transportados em suspensão, durante as cheias.

- Tendo em vista a dificuldade encontrada na determinação precisa da forma dos sedimentogramas para a obtenção do Sedimentograma Unitário, dificuldade esta devida às variações rápidas no valor da concentração de sedimentos em suspensão durante as cheias, conclui-se que:

5) Para a aplicação do método do Sedimentograma Unitário, é necessária a obtenção de maior número de amostras de mistura água-sedimento em períodos de cheia do que em períodos normais. Essas amostras podem ser obtidas pelo uso dos equipamentos automáticos (ANA-78 e AND-78) pesquisados neste trabalho.

6. BIBLIOGRAFIA CITADA

- ANDERSON, H.W. 1975. Relative contributions of sediment from source areas and transport processes. In: Sediment-Yield Workshop. Oxford, Miss., 1972. Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. S.l., Agricultural Research Service. p.66-73.
- BRASIL. Departamento Nacional de Obras de Saneamento. 1972. Relatório do estudo para o controle da erosão no noroeste do Paraná. Curitiba. 178p.
- _____. Ministério da Agricultura. Divisão de Pesquisa Pedológica. 1973. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul. Recife. 431p.
- BOWKER, A.H. & LIEBERMAN, G.J. 1959. Engineering statistics. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall. 585p.
- CARVALHO, N. de O. 1966. Descarga Sólida. Rio de Janeiro, DNAE. p.95-187. /Publicado com: SEREBRENICK, R. 1966. Hidrograma Unitário/.
- COMISSÃO ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Divisão de Projetos. Seção de Hidrologia (Rio Grande do Sul). 1958. Rio Camaquã; estudo sobre o transporte de sólidos. S.l. 137f.
- EINSTEIN, H.A. 1950. The bed-load function for sediment transportation in openchannel flows. Washington, U.S. Department of Agriculture. 78p. /Encadernado com: SHEN, Hsieh Wen, ed. 1972. Sedimentation.
- _____. 1964. River sedimentation. In: CHow, Ven Te, ed. Handbook of applied hydrology. New York, McGraw-Hill. Sect. 17-II, pt.2.
- FLEMING, G. 1975. Computer simulation techniques in hydrology. New York, Elsevier. 333p.
- FOSTER, G.R. & MEYER, L.D. 1975. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. In: Sediment-Yield Workshop. Oxford, Miss., 1972. Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. S.l., Agricultural Research Service. p.190-207.

- FOSTER, G.R.; HUGGINS, L.F.; MEYER, L.D. 1968. Simulation of overland flow on short field plots. Water Resources Research, Washington, 4(6):1179-87, Dec.
- GARCEZ, L. N. 1967. Hidrologia. São Paulo, Edgard Blücher. 249p.
- GLYMPH, L.M. 1975. Evolving emphases in sediment-yield predictions. In: Sediment-Yield Workshop. Oxford, Miss., 1972. Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. S.l., Agricultural Research Service. p.1-4.
- GRAF, W.H. 1971. Hydraulics of sediment transport. New York, McGraw-Hill. 513p.
- HEEDE, B.H. 1975. Stages of development of gullies in the West. In: Sediment-Yield Workshop. Oxford, Miss., 1972. Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. S.l., Agricultural Research Service. p.155-61.
- HIDROCEAN ENGENHARIA INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. s.d. Instrumentos de medição. Rio de Janeiro. n.p.
- HIDROLOGIA, S.A. s.d. Aparelhos e instrumentos marca "IH". Rio de Janeiro. n.p.
- HORTON, R.E. 1932. Drainage basin characteristics. Transactions. American Geophysical Union. Washington, 13: 350-61.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. 1979. Levantamento e prognóstico a respeito de assoreamento das barragens de Passo Real e Ernestina (RS) e Capivari (PR) - relatório de avaliação prévia da sedimentação - reservatório de Capivari (PR). São Paulo. 39f.
- INTER-AGENCY COMMITTEE ON WATER RESOURCES. Subcommittee on Sedimentation. 1961. The single-stage sampler for suspended sediment. Minneapolis, Minn., U.S. Gout. Print. Off. 105p.
- KORNITZ, D. 1973. Hydrometric stations in arid zones. In: International Association of Hydrological Sciences, Koblenz, 1970. Symposium on hydrometry. Paris. V.1, p.31-40.

- LINSLEY, R.K., Jr.; KOHLER, M.A.; PAULHUS, J.L.H. 1949. Applied hydrology. New York, McGraw-Hill. 689p.
- MEYER, L.D. 1971. Soil erosion by water on upland areas. In: SHEN, Hsieh Wen, ed. River mechanics. Fort Collins. V.2. Cap.27.
- MEYER, L.D. & WISCHMEIER, W.H. 1969. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. Transactions of the ASAE. Saint Joseph, Mich., 12:754-8, 62.
- MEYER, L.D.; FOSTER, G.R.; RÖMKENS, M.J.M. 1975. Source of soil eroded by water from upland slopes. In: Sediment-Yield Workshop. Oxford, Miss., 1972. Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. S.l., Agricultural Research Service. p.177-89.
- MORENO, J.A. 1961. Clima do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Secretaria da Agricultura. 42p.
- MUTCHLER, C.K. & YOUNG, R.A. 1975. Soil detachment by raindrops. In: Sediment-Yield Workshop. Oxford, Miss., 1972. Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. S.l., Agricultural Research Service. p.113-7.
- NORDIN, C.F. & McQUIVEY, R.S. 1971. Suspended load. In: SHEN, Hsieh Wen, ed. River mechanics. Fort Collins. V.1, cap.12.
- NORDIN, C.F. & RICHARDSON, E.V. 1971. Instrumentation and measuring techniques. In: SHEN, Hsieh Wen, ed. River mechanics. Fort Collins. V.1, cap.14.
- PIEST, R.F.; BRADFORD, J.M.; SPOMER, R.G. 1975. Mechanisms of erosion and sediment movement from gullies. In: Sediment-Yield Workshop. Oxford, Miss., 1972. Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. S.l., Agricultural Research Service. p.162-76.
- PIEST, R.F.; KRAMER, L.A.; HEINEMANN, H.G. 1975. Sediment movement from loessial watersheds. In: Sediment-Yield Workshop. Oxford, Miss., 1972. Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. S.l., Agricultural Research Service. p.130-141.
- PINTO, N.L. de S.; HOLTZ, A.C.T.; MARTINS, J.A.; GOMIDE, F.L.S. 1976. Hidrologia básica. São Paulo, Edgard Blücher. 278p.

- PONTES, A.B. 1975. O controle da erosão em voçorocas em áreas urbanas da região noroeste do Paraná. Rio de Janeiro, DNOS. 80p.
- PORTERFIELD, G. 1972. Computation of fluvial-sediment discharge. Washington, U.S. Govt. Print. Off. 66p.
- RÉMÉNIÉRAS, G. 1971. Tratado de hidrologia aplicada. Barcelona, ETA. 515p.
- RENDON-HERRERO, O. 1974. Estimation of washload produced on certain small watershed. Journal of the Hydraulics Division. New York, 100(7):835-48, July.
- ROCHÉ, M. 1963. Hydrologie de surface. Paris, Gauthier-Villars. 429p.
- SEDIMENT-YIELD WORKSHOP. Oxford, Miss., 1972. 1975. Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. S.l., Agricultural Research Service. 285p.
- SEMMELMANN, F.R. 1973. Estudo sedimentológico no canal São Gonçalo; relatório final. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. 2v.
- _____, Coord. 1978. Estudo de avaliação da retenção potencial de sedimentos em represas de aproveitamentos hidrelétricos projetados para a bacia do rio Uruguai à montante do rio Peperi-Guaçu; relatório final. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. 23f.
- SEREBRENICK, R. 1966. Hidrograma Unitário; definições, finalidade, estabelecimento e aplicações técnicas do hidrograma unitário para uma bacia hidrográfica. Rio de Janeiro, DNAE. p.21-91. /Publicado com: CARVALHO, N. de O. 1966. Descarga sólida.
- SHEN, H.W. 1971. Washload and bed load. In: _____. River mechanics. Fort Collins. V.1, cap.11.
- _____. 1976. Sediment transport models. In: _____. Stochastic approaches to water resources. Fort Collins. V.2, cap.26.
- SHEN, H.W. & LI, R.M. 1976. Watershed sediment yield. In: _____. Stochastic approaches to water resources. Fort Collins. V.2, cap.21.

- SHERMAN, L.K. 1942. The unit hydrograph method. In: MEINZER, O.E., ed. Hydrology. New York, Dover. Cap. 11E., p.514-25.
- SIMONS, D.B. & SENTÜRK, F. 1977. Sediment transport technology. Fort Collins, Water Resources Publications. 807p.
- SPIEGEL, M.R. 1971. Estatística. Rio de Janeiro, McGraw-Hill. 580p.
- STICHLING, W. 1969. Instrumentation and techniques in sediment surveying. In: Hydrology Symposium, 7. Proceedings. S.l., National Research Council of Canada. p.81-139.
- STRAHLER, A.N. 1964. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel network. In: CHOW, Ven Te, ed. Handbook of applied hydrology. New York, McGraw-Hill. Sect. 4-II, pt.2.
- TASK COMMITTEE ON PREPARATION OF SEDIMENTATION MANUAL. 1965. Sediment transportation mechanics: nature of sedimentation problems. Journal of the Hydraulics Division, New York, 91(2):251-66, Mar.
- _____. 1969a. Sediment measurement techniques: A. Fluvial sediment. Journal of the Hydraulics Division, New York, 95(5):1477-514, Sept.
- _____. 1969b. Sediment measurement techniques: F. Laboratory procedures. Journal of the Hydraulics Division. New York, 95(5):1515-43, Sept.
- _____. 1970. Sediment sources and sediment yields. Journal of the Hydraulics Division, New York, 96(6):1283-329, June.
- 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.
- WISCHMEIER, W.H. 1973. Upslope erosion analysis. In: SHEN, Hsieh Wen, ed. Environmental impact on rivers. Fort Collins. Cap.15.
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. 1961. A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning. In: International Congress of Soil Science, 7. Madison, 1960. Transactions... Amsterdam, Elsevier. p.418-25.

7. ANEXOS

7.1. ANEXO I - Características físicas da Bacia do Rio Forquetinha

- PERÍMETRO: O perímetro da bacia hidrográfica é definido pelo comprimento da linha de contorno que delimita a sua superfície.

Mediante um curvímetro, seguindo a linha de contorno da bacia hidrográfica traçada na sua individualização no mapa, determinou-se o perímetro (o mapa utilizado foi o do Ministério da Guerra, em escala 1:50.000)

$$P = 104 \text{ Km}$$

- ÍNDICE DE COMPACIDADE: A forma geométrica da bacia hidrográfica tem influência no tipo do hidrograma resultante de uma dada chuva. De forma que, para uma mesma superfície e para uma mesma chuva, o hidrograma de saída de uma bacia de forma circular será muito diferente do de uma bacia com forma alongada (RÉMINIÉRÁS, 1971).

Índice de Compacidade ou Coeficiente de Gravelius é definido como a relação entre o perímetro da bacia hidrográfica e a circunferência de círculo de área igual a da bacia (ROCHE, 1963).

A fórmula após transformações é :

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Onde K_c é o coeficiente de Gravelius, P é o perímetro da bacia em Km e A , a área da bacia em Km^2 .

O Coeficiente de Gravelius, para a bacia em estudo, resultou em:

$$K_c = 1,65$$

Mantendo outros fatores constantes, valores menores de Índice de Compacidade têm maior potencialidade de produção de picos de enchentes elevados. O valor mínimo deste índice corresponde a uma bacia de forma circular com $K_c = 1$ (GARCEZ, 1967).

- COEFICIENTE DE FORMA OU ÍNDICE DE CONFORMAÇÃO: Índice de conformação é a relação entre a área de uma bacia hidrográfica e o quadrado de seu comprimento axial, medido ao longo do curso d'água, da secção de referência até a cabeceira mais distante no divisor de águas (GARCES, 1967).

$$K_f = \frac{A}{L^2} = \frac{310}{45^2} = 0,15$$

Onde A é área da bacia em Km^2 e L o comprimento axial em Km.

Quanto maior o índice de conformação, maior será a potencialidade de ocorrência de picos de enchentes elevados, se outros fatores se mantiverem constantes.

- ALTITUDES CARACTERÍSTICAS: As altitudes características são obtidas das Curvas Hipsométrica e de Frequências Altimétricas.

O relevo da bacia hidrográfica pode ser representado pela Curva Hipsométrica, traçada em coordenadas cartesianas, onde a altitude é dada em abcissa, e, em ordenada, as porcentagens de áreas com elevações acima (ou abaixo) das diversas curvas de nível. Pode o relevo também ser representado por Curva de Frequências Altimétricas, em forma de Histograma, apresentando as superfícies compreendidas entre altitudes escalonadas (GARCES, 1967).

A curva Hipsométrica e a Curva de Frequências Altimétricas estão representadas na Figura nº 42, conforme valores de terminados na Tabela nº 26.

Tabela Nº 26. Determinação das curvas Hipsométricas e Frequências Altimétricas

Altitude (m)	Área (Km ²)	%	Área no intervalo (Km ²)	%
			24,42	7,88
>600	24,42	7,88	85,51	27,59
>500	109,93	35,46	74,35	23,98
>400	184,28	59,45	60,46	19,50
>300	244,74	78,95	39,00	12,58
>200	283,74	91,53	19,14	6,17
>100	302,88	97,70	7,12	2,30
> 50	310,00	100,00		
TOTAL	310,00		310,00	100,00

BACIA DO FORQUETINHA
 CURVA HIPSOMÉTRICA
 CURVA FREQUÊNCIA ALTIMÉTRICA

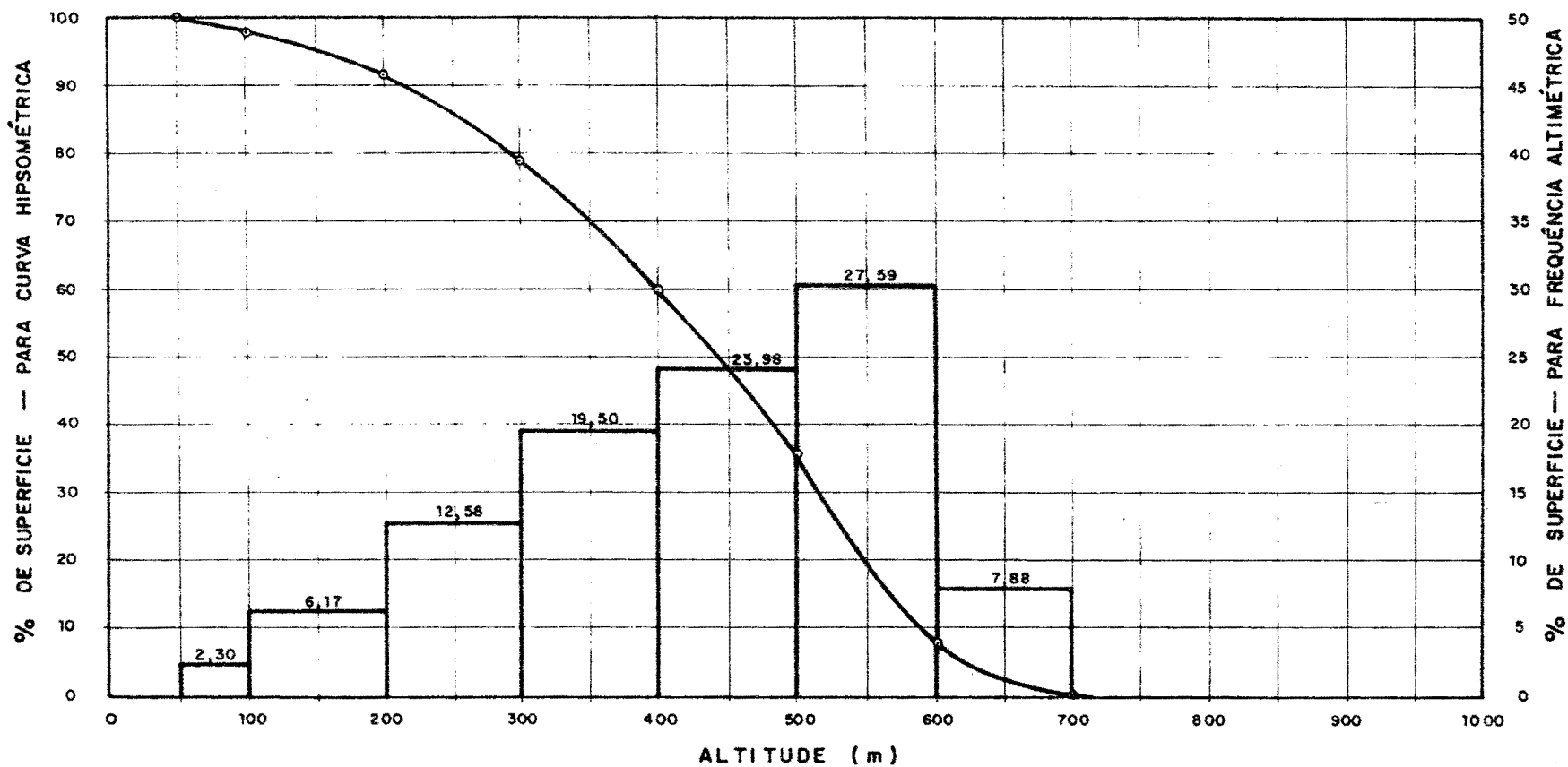


Figura Nº 42 .-

- Altitude Máxima = 700 m. É a altitude máxima observada na planta altimétrica da bacia.
- Altitude Mínima = 50 m. É a altitude mínima observada da planta altimétrica da bacia, é a cotada secção de referência, Posto-4,
- Altitude média = 375 m. É a média aritmética das altitudes máxima e mínima.
- Altitude Mediana = 443 m. É a ordenada média da curva hipsométrica.
- Altitude mais Frequente = 550 m. É máxima da curva de frequências altimétricas.
- RETÂNGULO EQUIVALENTE: O Retângulo Equivalente foi introduzido pelo hidrólogo francês ROCHE (1963), com o intuito de melhor comparar a influência das características físicas da bacia sobre o escoamento superficial.

Consiste em transformar a forma natural da bacia em um retângulo hipotético que mantém a mesma superfície, o mesmo coeficiente de Gravelius e a mesma distribuição hipsométrica. As curvas de níveis são dispostas paralelamente ao lado menor do retângulo.

Conforme ROCHE os lados do retângulo são **determinados** conforme equações abaixo:

$$L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc}\right)^2} \right] = 44,99 \text{ Km}$$

$$l = \frac{Kc\sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Kc}\right)^2} \right] = 6,89 \text{ Km}$$

onde L e l são o lado maior e o menor, respectivamente, do Retângulo Equivalente em Km; Kc é o coeficiente de Gravelius e A a área da bacia em Km².

O retângulo equivalente está representado, graficamente, na Figura nº 43.

- DECLIVIDADE MÉDIA DA BACIA: A declividade das vertentes da bacia hidrográfica pode ser representada pelo Índice de Sucetibilidade ao escoamento, idealizado pelo hidrólogo ROCHE (1963).

A fórmula final, após transformações, apresenta o seguinte aspecto:

$$I_p = \frac{l}{L} \sum_{i=1}^n \sqrt{\beta_i} (a_i - a_{i-1}) \quad ; \quad \beta_i = \frac{X_i}{L}$$

onde:

I_p = índice de sucetibilidade, de Roche;

L = lado maior do retângulo equivalente;

β_i = fração da superfície total da bacia, compreendida entre as curvas de nível a_i e a_{i-1} , dada pela distribuição hipsométrica;

X_i = distância que separa duas curvas de nível, a_i e a_{i-1} , no retângulo equivalente;

a_i = curvas de nível dadas em altitude.

Os cálculos estão indicados na Tabela nº 27, donde resultou o seguinte valor:

$$I_p = 0,116 \text{ m/m}$$

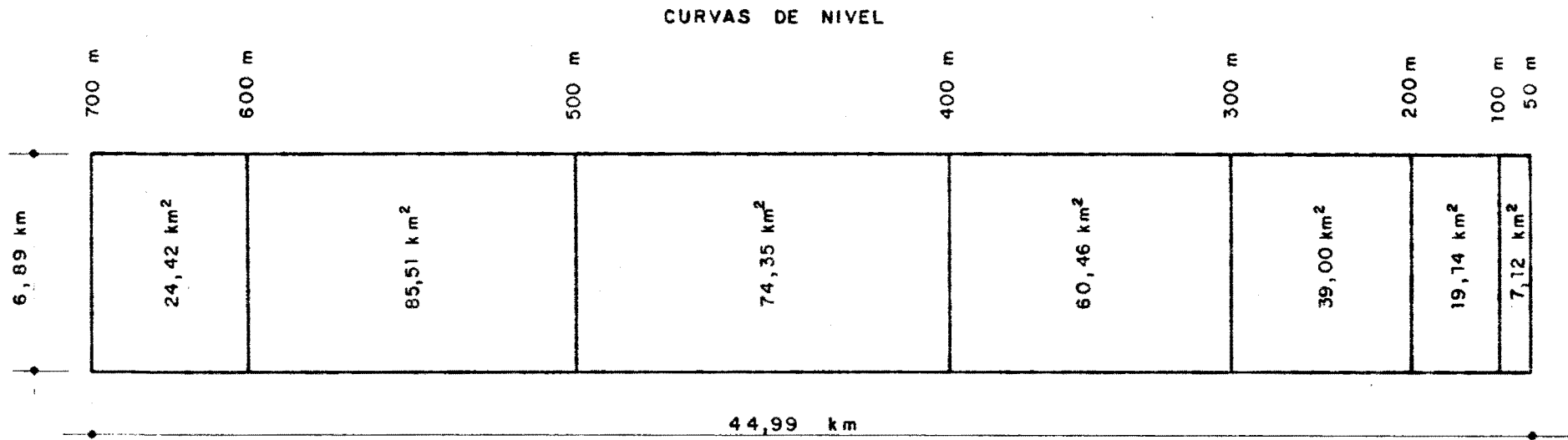


Figura Nº 43 .-

RETÂNGULO EQUIVALENTE

ÁREA = 310,00 km²

L = 44,99 km

l = 6,89 km

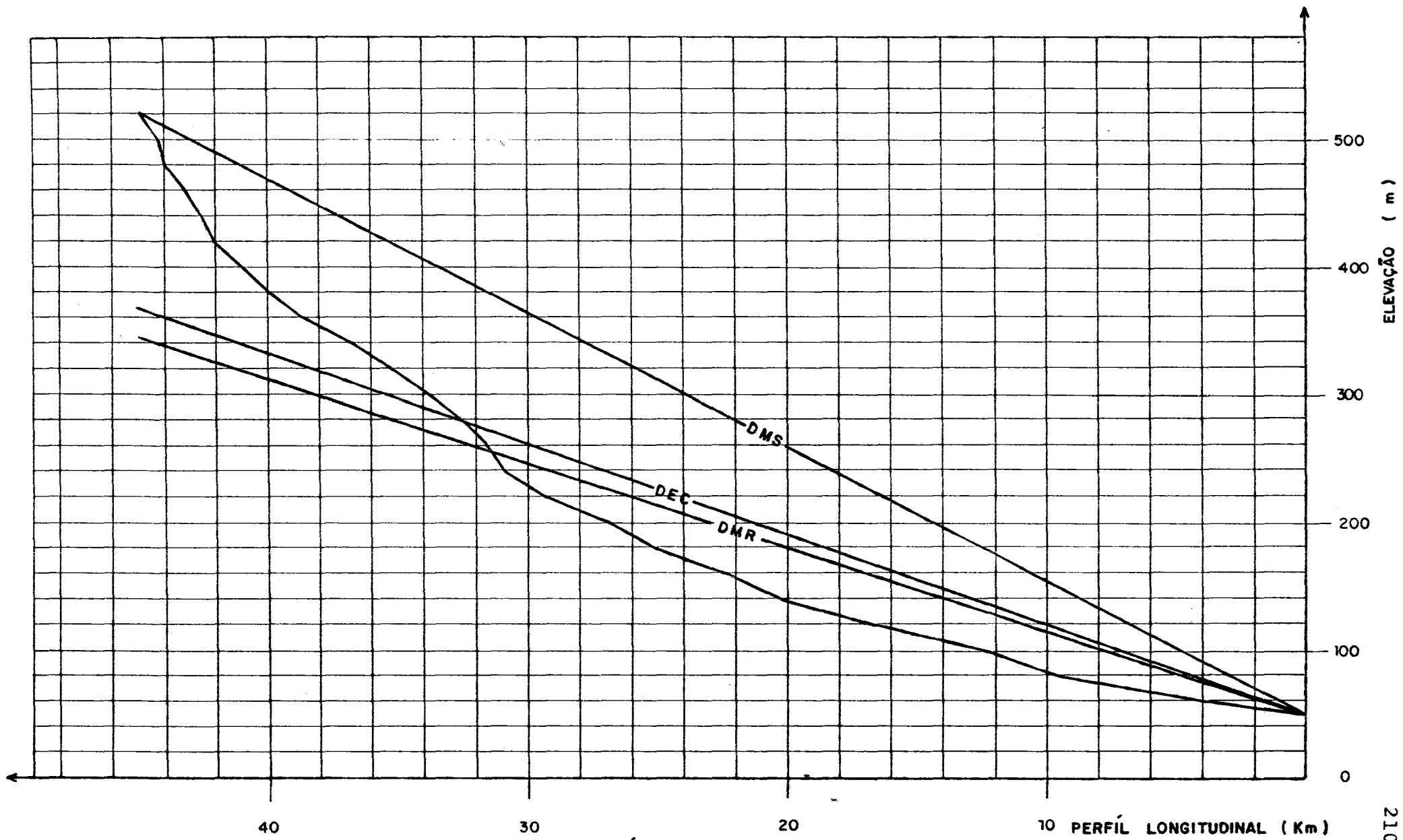
Tabela Nº 27. Cálculo do Índice de suscetibilidade, de Roché

ALTITUDE (m)	$a_i - a_{i-1}$ (Km)	X_i (Km)	$\beta_i = \frac{X_i}{L}$	$\beta_i (a_i - a_{i-1})$
50 ~ 100	0,05	1,03	0,023	0,034
100 ~ 200	0,10	2,78	0,062	0,079
200 ~ 300	0,10	5,66	0,126	0,112
300 ~ 400	0,10	8,78	0,195	0,140
400 ~ 500	0,10	10,79	0,240	0,155
500 ~ 600	0,10	12,41	0,276	0,166
600 ~ 700	0,10	3,54	0,079	0,089
				$\Sigma = 0,775$

- PERFIL LONGITUDINAL DO CURSO D'ÁGUA: É representado marcando-se em abcissa o desenvolvimento longitudinal do leito (ou cota d'água) (RÉMÉNIÉRAS, 1971). Quando o perfil é plotado com base em mapas topográficos, as elevações são estimadas através de curvas de nível e a distinção entre o leito e superfície do rio são negligenciadas em rios de baixa ordem (HORTON, 1932).

A representação gráfica do perfil longitudinal do Rio Forquetinha é representada na Figura Nº 44.

- DECLIVIDADE DO PERFIL LONGITUDINAL DO CURSO DE ÁGUA : A observação do perfil longitudinal do Rio Forquetinha (Fig. 44) mostra a sua forma côncava, isto é, decréscimo do gradiente no sentido de montante para jusante, que é a forma característica da maioria dos rios, como observa STRAHLER (1964).



PERFÍL LONGITUDINAL E DECLIVIDADES
DO RIO FORQUETHINHA

Figura Nº 44 .-

210

N O M E

====

```

C     CALCULO DE DECLIVIDADES DE CURSO D'AGUA (M/KM)
C     DMS = DECLIVIDADE MEDIA SIMPLES                211
C     DMP = DECLIVIDADE MEDIA PONDERADA
C     DMR = DECLIVIDADE MEDIA RACIONAL
C     DEC = DECLIVIDADE EQUIVALENTE CONSTANTE

DIMENSION X(100),Y(100),ALT(99),HOR(99),COMPR(99),ELEM(99),TRI(99)
1,AREA(99),DECL(99),RDECL(99),RET(99)
READ(5,111)N

READ(5,222)(Y(I),Y(I),I=1,N)
111 FORMAT(I3)
222 FORMAT(10F3.2)

C     CALCULO DE DECLIVIDADE MEDIA SIMPLES (DMS)
C     N = NUMERO DE PONTOS
C     X(I)= DISTANCIA EM KM CRESCENDO DE SUS.P/MONT.
C     Y(I)= ALTITUDE REFERENCIADO NO NMM
DMS=(Y(N)-Y(1))/(X(N)-X(1))

C     CALCULO DE DECLIVIDADE MEDIA PONDERADA (DMP)
C     ALT(I)= DIFERENCA DE COTA EM CADA INTERVALO
C     HOR(I)= COMPRIM.HORIZONTA L CADA INTERVALO
C     COMPR(I)= COMPRIM.CADA TRECHO RETILINEO DO PERFIL
C     COMPT = COMPTI.TOTAL DO PERFIL
C     ELEM(I)= CADA ELEMENTO DO SOMATORIO
C     SOM = SOMATORIO DOS ELEMENTOS
COMPT=0.
SOM=0.

DO 101 I=1,N-1
ALT(I)=Y(I+1)-Y(I)
HOR(I)=X(I+1)-X(I)
COMPR(I)=((ALT(I)**2)+(HOR(I)**2))**.5
COMPT=COMPT+COMPR(I)
ELEM(I)=(ALT(I)/HOR(I))*COMPR(I)
101 SOM=SOM+ELEM(I)
DMP=SOM/COMPT

C     CALCULO DE DECLIVIDADE MEDIA RACIONAL (DMR)
C     TRI(I)= AREA DO TRIANGULO
C     RET(I)= AREA DO RETANGULO
C     AREA(I)=SOMA DO TRI E RET
C     AREAT= SOMATORIO DAS AREAS
C     B = BASE DO TRIANGULO
C     A = ALTURA DO TRIANGULO
AREAT=0.
DO 102 I=1,N-1
TRI(I)=(HOR(I)*ALT(I))/2.
RET(I)=(HOR(I))*(Y(I)-Y(I+1))
AREA(I)=TRI(I)+RET(I)
102 AREAT=AREAT+AREA(I)
B=X(N)-X(1)
A=AREAT*2./B
DMR=A/B

C     CALCULO DE DECLIVIDADE EQUIVALENTE CONSTANTE (DEC)
C     DECL(I)= DECLIVIDADE DE CADA TRECHO
C     RDECL= RAIZ QUADR. DE DECL
C     RDECE= RAIZ QUADR. DE DEC
SOM=0.
DO 103 I=1,N-1
DECL(I)=(ALT(I))/(HOR(I))

```

A caracterização numérica da declividade do álveo pode ser determinada por diferentes métodos, conforme GARCÉS (1967):

- Declividade Média Simples: É a razão entre a diferença total de elevação do leito, pela extensão horizontal do curso d'água entre a cabeceira e a secção de referência.

$$DMS = \frac{H}{L} = 10,47 \text{ m/Km}$$

- Declividade Média Ponderada: É a média ponderada das declividades dos trechos retilíneos, subdivididos.

$$DMP = \frac{1}{\sum L_i} \sum \left(\frac{h_i}{l_i} \right) L_i = 19,26 \text{ m/Km}$$

onde: L_i = comprimento de cada trecho retilíneo do perfil;

h_i = diferença de elevação de cada trecho do perfil;

l_i = comprimento horizontal de cada trecho do perfil.

- Declividade Equivalente Constante: A raiz quadrada da declividade equivalente constante é a média harmônica ponderada da raiz quadrada dos diversos trechos retilíneos, tomando-se como peso a extensão de cada trecho.

É um índice idealizado para representar o tempo de translação da água ao longo do perfil longitudinal, admitindo-se que esse tempo varie com o inverso da raiz quadrada de declividade.

$$\frac{1}{\sqrt{\text{DEC}}} = \frac{\sum \left(\frac{l_i}{I_i} \right)}{\sum (l_i)} \quad \text{DEC} = 7.07 \text{ m/Km}$$

onde: I_i é a declividade de cada trecho.

Para o desenvolvimento dos cálculos, a extensão do perfil longitudinal do Rio Forquetinha foi subdividido em 25 trechos retilíneos, com base em curvas de nível traçadas sobre o mapa do Ministério da Guerra (Escla 1:50.000).

Um pequeno programa de computador foi desenvolvido para a execução dos cálculos na determinação das declividades acima descritas. As declividades obtidas estão graficadas na Figura nº 44.

7.2. ANEXO II - Correlação entre os valores de concentração de sedimentos em suspensão, obtidos pelos amostradores utilizados pelo observador e o US-D49.

A eficiência do amostrador de integração vertical utilizado pelo observador, em programa rotineiro, é verificada com relação ao amostrador de integração vertical US-D49, em programas periódicos.

Uma reta de regressão dos mínimos quadrados dos valores obtidos pelo amostrador utilizado pelo observador para os ob

tidos pelo amostrador US-D49, é determinada, e a sua adequa-
 cidade é verificada através dos coeficientes estatísticos, co-
 mo segue:

- equação da reta dos mínimos quadrados:

$$\text{OBS} = a + b \cdot \text{USD}$$

ou
$$Y = a + b \cdot X$$

onde: OBS = valores da concentração de sedimentos em sus-
 pensão, obtidos pelo amostrador utilizado pe-
 lo observador;

USD = valores de concentração obtidos pelo amostra-
 dor US-D49, em amostragem periódicas

- equações normais:

$$\Sigma Y = aN + b\Sigma X$$

$$\Sigma XY = a\Sigma X + b\Sigma X^2$$

- cálculo dos coeficientes:

$$a = \frac{(\Sigma Y)(\Sigma X^2) - (\Sigma X)(\Sigma XY)}{N\Sigma X^2 - (\Sigma X)^2} = 9,83$$

$$b = \frac{N\Sigma(XY) - (\Sigma X)(\Sigma Y)}{N\Sigma X^2 - (\Sigma X)^2} = 0,91$$

Os coeficientes são calculados na planilha apresentada

na Tabela nº 28.

- a equação da reta de regressão dos mínimos quadrados resultante é:

$$Y = 9,83 + 0,91.X$$

ou $OBS = 9,83 + 0,91.USD$

A reta de regressão dos mínimos quadrados dos valores de OBS para USD está graficada na Figura nº 45.

Tabela Nº 28. Determinação da reta de regressão-correlação entre amostradores

AMOSTRAGEM		VAZÃO m ² /s	CONCENTRAÇÃO (mg/l)				
Data	Vertical		USD = X	OBS = Y	X ²	Y ²	XY
21/11	21	45,48	139,28	140,83	19398,92	19833,09	19614,80
21/11	28	45,48	120,53	138,83	14527,48	19273,77	16697,02
21/11	33	45,48	140,04	121,56	19611,20	14776,83	17023,26
22/11	21	38,80	66,85	70,23	4468,92	4932,21	4649,88
22/11	28	38,80	73,89	75,01	5400,78	5626,50	5512,48
22/11	33	38,80	90,73	86,20	8231,93	7430,44	7820,93
23/11	21	30,40	16,45	25,96	270,60	654,85	427,04
23/11	28	30,40	30,03	29,59	910,80	875,57	888,59
23/11	33	30,40	26,89	40,47	723,07	1637,82	1088,24
		Σ	704,29	728,68	73534,71	75041,12	73767,24

- erro padrão de estimativa:

$$s_{yx} = \sqrt{\frac{\Sigma Y^2 - a\Sigma Y - b\Sigma XY}{N}} = 9,567$$

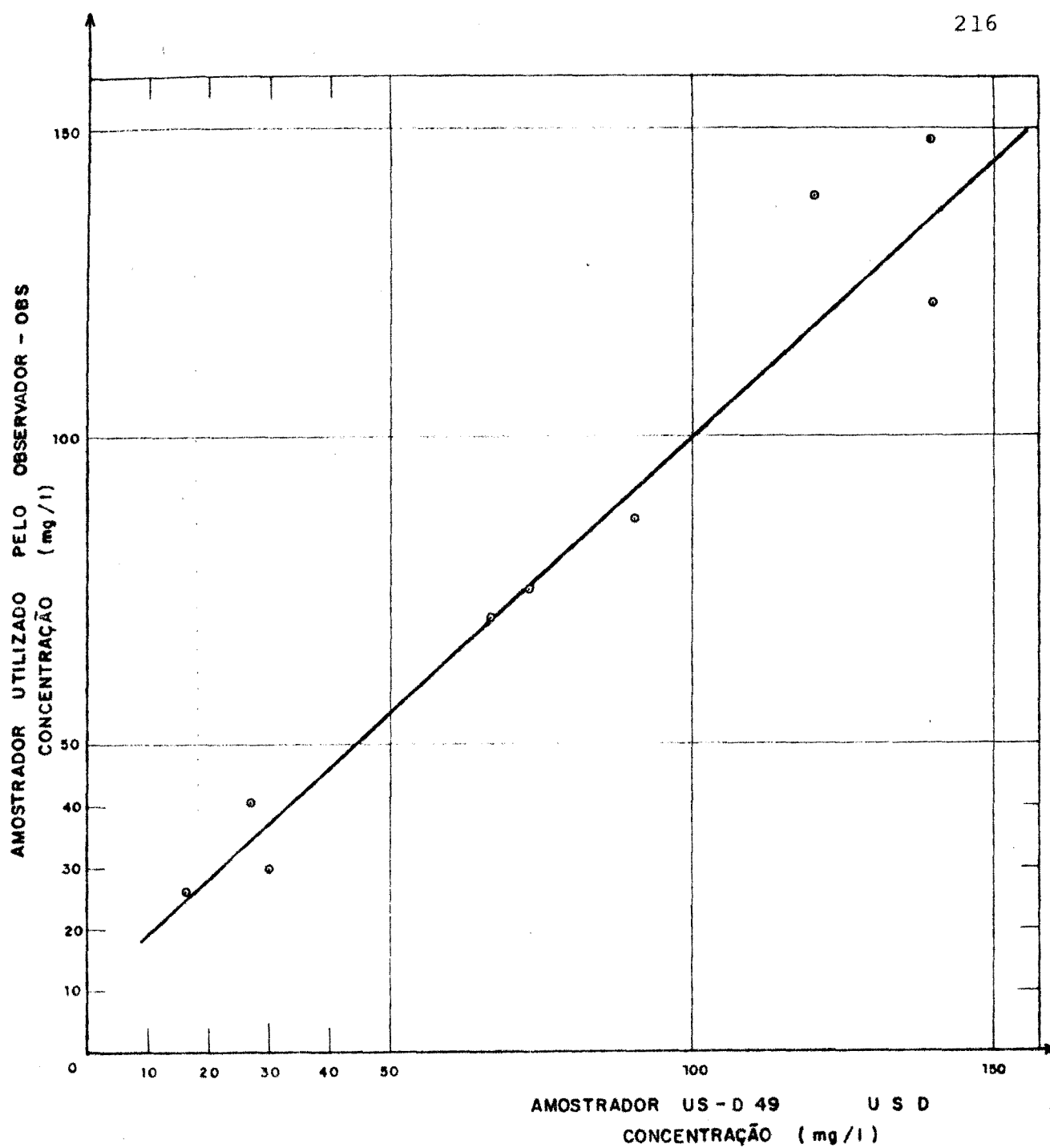


Figura Nº 45.-

RETA DE REGRESSÃO
CORRELAÇÃO ENTRE AMOSTRADORES

- erro padrão corrigido para pequenas amostras:

$$\hat{s}_{yx} = \sqrt{\frac{N}{N-2}} \cdot s_{yx} = 10,848$$

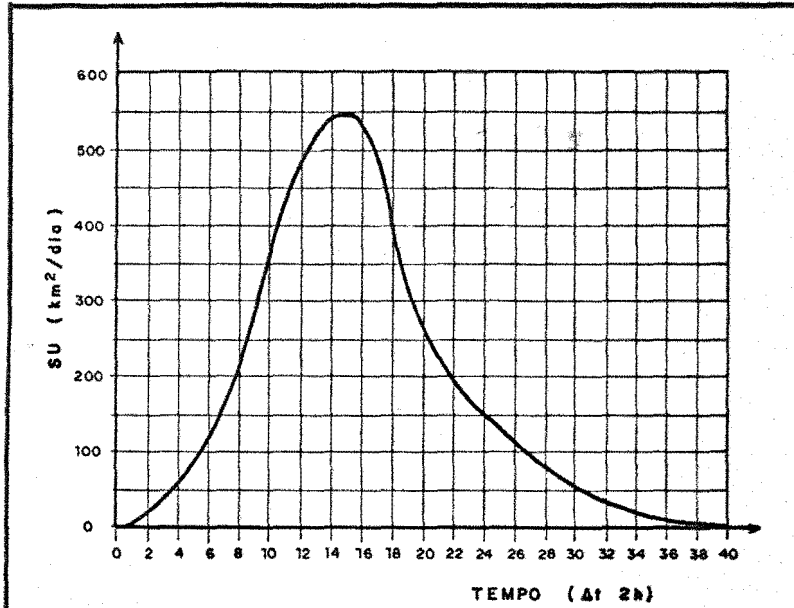
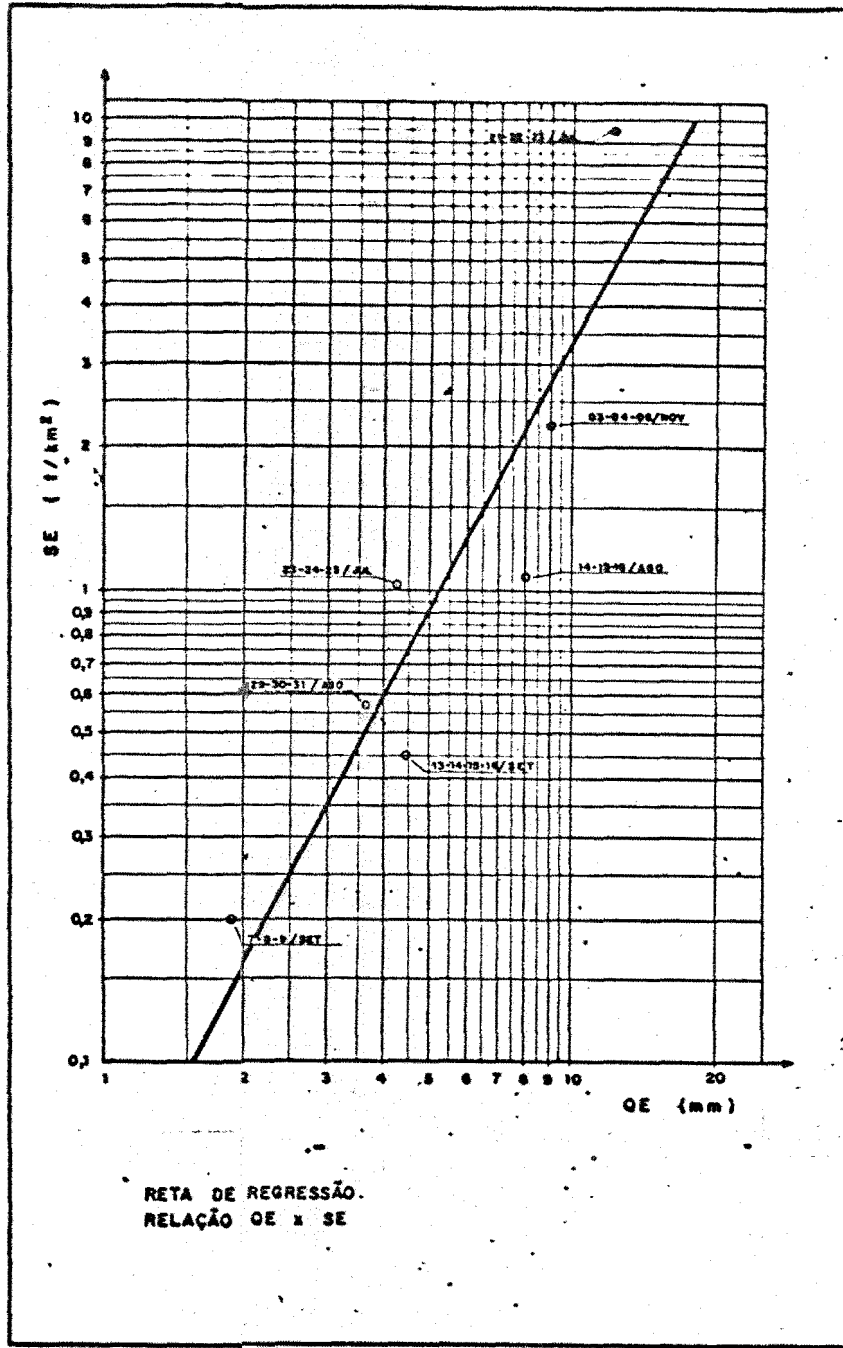
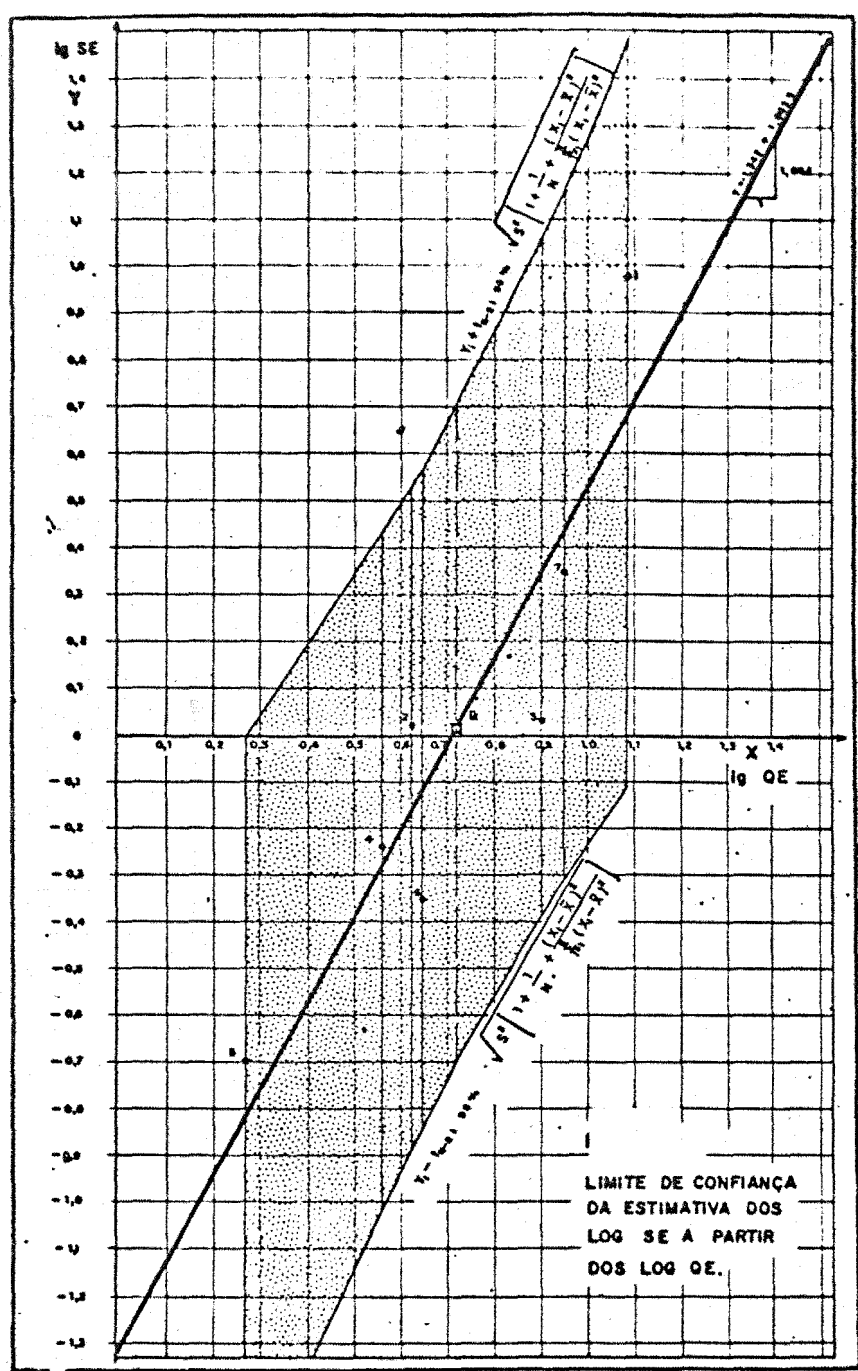
- coeficiente de correlação:

$$r = \frac{N\sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[N\sum X^2 - (\sum X)^2][N\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} = 0,974$$

- coeficiente de determinação:

$$r^2 = 0,949$$

O coeficiente de correlação ($r = 0,974$) traduz o grau de ajustamento aos dados, da equação linear admitida. Enquanto que o coeficiente de determinação ($r^2 = 0,949$) indica a relação existente entre a variação explicada e a variação total.



TEMPO (h)	SU (1,6) (km²/d)
0	0
2	20
4	60
6	120
8	210
10	360
12	480
14	540
16	540
18	410
20	270
22	200
24	150
26	120
28	80
30	50
32	30
34	20
36	10
38	5
40	0

Figura Nº 40 .-
 RELAÇÃO QE x SE
 SEDIMENTOGRAMA UNITÁRIO SU(1,6)
 BACIA DO RIO FORQUETINHA - POSTO 4
 17 JUL - 17 NOV / 1978