

ESTIMATIVA DA DESCARGA SÓLIDA DO CÓRREGO VINTE E UM,  
REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ

Sebastian Ivan Pedrero Quiñones

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Geraldo Wilson Júnior

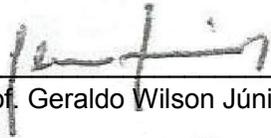
Rio de Janeiro  
Junho de 2013

ESTIMATIVA DA DESCARGA SÓLIDA DO CÓRREGO VINTE E UM, REGIÃO  
NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ

Sebastian Ivan Pedrero Quiñones

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:



---

Prof. Geraldo Wilson Júnior, Docteur d'État.



---

Prof. Raad Yahya Qassim, Ph.D.



---

Prof. Geraldo Freitas Maciel, Ph.D.



---

Prof. José Carlos Cesar Amorim, Ph.D.



---

Prof. Márcia Maria Guimarães, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2013

Quiñones, Sebastian Ivan Pedrero

Estimativa da Descarga Sólida do Córrego Vinte e Um, Região Noroeste do Estado do Paraná. / Sebastian Ivan Pedrero Quiñones. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XVIII, 156 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Geraldo Wilson Júnior

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 152-156.

1. Movimento de sedimentos. 2. Traçadores Radioativos. 3. Equações de descarga sólida por arraste.  
I. Wilson Júnior, Geraldo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica.  
III. Título.

*A mi família*

## **AGRADECIMENTOS**

A mi esposa Soledad por el apoyo en esta aventura, que por cierto, fue idea suya. A mi hija Maite por que es la fuente de mi energía para seguir adelante.

Ao professor Geraldo Wilson Júnior. Pela orientação e disposição no desenvolvimento da dissertação.

A CAPES pela bolsa de estudos, indispensável à minha permanência no Rio de Janeiro.

À secretária do Departamento de Engenharia Costeira, Sra. Marise Cardoso. Cuja ajuda e apoio tornaram este processo menos difícil do que é.

Aos professores e alunos do Departamento de Engenharia Costeira pela disposição em ajudar e ensinar.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

## ESTIMATIVA DA DESCARGA SÓLIDA DO CÓRREGO VINTE E UM, REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ

Sebastian Ivan Pedrero Quiñones

Junho/2013

Orientador: Geraldo Wilson Júnior

Programa: Engenharia Oceânica

Os processos erosivos na Região Noroeste do Estado do Paraná, provocados pela intensiva e desordenada ocupação do solo, em meados do século passado, motivaram a realização de estudos hidrossedimentológicos como parte de esforços conjugados: municipal, estadual, nacional e da OEA para o combate da erosão. O Rio Ivaí, afluente do Rio Paraná, e quatro de suas sub-bacias que caracterizam tipo e uso diferentes do solo, foram estudadas: entre elas, a do Córrego Vinte e Um.

Os objetivos principais desta dissertação foram a aplicação e aperfeiçoamento de metodologia desenvolvida no Brasil, por VUKMIROVIC' e WILSON-JR. (WILSON-JR., 1999) sobre o estudo do movimento de sedimentos em escoamentos com superfície livre, a qual utiliza métodos topobatimétricos e a técnica de traçadores radioativos, para calibrar e validar equações analíticas da descarga sólida por arraste. Foram utilizadas as equações de EINSTEIN (1950), VUKMIROVIC' e VUKOTIC' (1981), e VAN RIJN (1984), em conjunto com o Método do Balanço das Taxas de Contagem (COURTOIS e SAUZAY, 1966).

Conclui-se que as equações de transporte sólido podem ser ajustadas aos resultados obtidos dos ensaios com traçadores radioativos, ou seja, suas equações podem ser calibradas para permitir que os resultados sejam próximos ou iguais àqueles medidos com traçadores radioativos no Córrego Vinte e Um. Recomenda-se a adoção desta Metodologia com utilização de novos métodos de calibração e validação das expressões e modelos do movimento de sedimentos, tais como uso de imagens de satélite, em conjunto com os levantamentos topobatimétricos.

O tratamento dos dados hidrossedimentológicos, assim como dos traçadores radioativos e dos levantamentos topobatimétricos são parte integrante da presente dissertação.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

AN ESTIMATION OF SOLID DISCHARGE FROM VINTE E UM STREAM,  
NORTHWEST REGION OF PARANÁ STATE

Sebastian Ivan Pedrero Quiñones

June/2013

Advisor: Geraldo Wilson Júnior

Department: Oceanic Engineering

The erosion in the Northwestern Region of Paraná State, caused by intensive and disorderly land use in the middle of the last century, led to the realization of a series of studies hydrosedimentological as part of joint efforts: local, state, national and OEA for combat erosion. The Ivaí River, a tributary of the Paraná River and its four sub-basins that characterized different type and use of soil, were studied, including the “CórregoVinteeUm” sub-basin.

The main objectives of this dissertation were the implementation and improvement of methodology developed in Brazil, for VUKMIROVIC' and WILSON-JR (WILSON-JR, 1999) on the study of the movement of sediment in free surface flows, which uses topobathymetrics methods and technique of radioactive tracers to calibrate and validate analytical equations of bed load sediment discharge. EINSTEIN's equations (1950), VUKMIROVIC' and VUKOTIC' (1981) and VAN RIJN (1984) were used in conjunction with the Method of Balance of the Exchange Count (COURTOIS and SAUZAY, 1966).

It follows that the equations of sediment transport can be adjusted to the results obtained from tests with radioactive tracers, that is, their equations can be calibrated to allow the results to be near or equal to those measured with radioactive tracers in “Vinte e Um” stream. It is recommended to adopting this methodology with the use of new methods of calibration and validation of models and expressions of the movement of sediments, such as the use of satellite imagery, together with topobathymetrics surveys.

The treatment of hydrosedimentological data, as well as radioactive tracers and topobathymetric records are an integral part of this dissertation.

# SUMÁRIO

	Páginas
<b>I</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> ..... 1
<b>I.1</b>	<b>OBJETIVOS</b> ..... 2
<b>I.1.1</b>	<b>Objetivo Principal</b> ..... 2
<b>I.1.2</b>	<b>Objetivos Secundários</b> ..... 2
<b>I.2</b>	<b>ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO</b> ..... 3
<b>II</b>	<b>PROCESSO EROSIVO NA REGIÃO NOROESTE DO PARANÁ</b> ..... 6
<b>II.1</b>	<b>REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ</b> ..... 6
<b>II.1.1</b>	<b>Caracterização Histórica da Região Noroeste</b> ..... 7
<b>II.1.2</b>	<b>A Região Noroeste do Paraná em Relação ao Estado e à Nação</b> ..... 8
<b>II.1.3</b>	<b>Caracterização Física</b> ..... 9
<b>II.2</b>	<b>PROCESSO EROSIVO NOS ANOS SETENTA</b> ..... 10
<b>II.2.1</b>	<b>Descrição do Processo Erosivo</b> ..... 10
<b>II.2.2</b>	<b>Formas de Erosão</b> ..... 11
<b>II.2.2.1</b>	<b>Distribuição local dos tipos de erosão</b> ..... 13
<b>II.2.3</b>	<b>Combate à Erosão: Estudos Hidrossedimentométricos na Bacia Hidrográfica do Rio Ivai</b> ..... 14
<b>II.2.3.1</b>	<b>Sub-bacia do córrego Vinte e Um</b> ..... 16
<b>III</b>	<b>METODOLOGIA</b> ..... 18
<b>III.1</b>	<b>DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DA METODOLOGIA ADOTADA NO CÓRREGO VINTE E UM</b> ..... 19
<b>III.1.1</b>	<b>Conhecimento da Bacia Hidrográfica</b> ..... 19
<b>III.1.2</b>	<b>Escolha e Preparação do Trecho Representativo do Escoamento</b> ..... 19
<b>III.1.3</b>	<b>Medidas Realizadas no Trecho Representativo</b> ..... 20
<b>III.2</b>	<b>CAMPANHAS DE MEDIDAS REALIZADAS NO CÓRREGO VINTE E UM</b> ..... 21
<b>III.2.1</b>	<b>Campanhas de Observações Diárias</b> ..... 21
<b>III.2.2</b>	<b>Campanhas de Observações Periódicas</b> ..... 21
<b>III.2.3</b>	<b>Campanhas Intensivas de Medições</b> ..... 22
<b>III.2.4</b>	<b>Determinação das Características Hidráulicas e Sedimentológicas do Trecho Representativo da Bacia</b> ..... 22
<b>IV</b>	<b>TRATAMENTO DOS DADOS DE CAMPO DAS CAMPANHAS HIDROSSEDIMENTOMÉTRICAS</b> ..... 25
<b>IV.1</b>	<b>DADOS PLUVIOMÉTRICOS E DE NÍVEL D'ÁGUA</b> ..... 25
<b>IV.2</b>	<b>DADOS DE VELOCIDADE E CÁLCULO DE VAZÃO LÍQUIDA</b> ..... 34
<b>IV.2.1</b>	<b>Modelos Aditivos Generalizados (MAG)</b> ..... 39
<b>IV.3</b>	<b>DADOS SEDIMENTOLÓGICOS</b> ..... 43
<b>IV.3.1</b>	<b>Sedimentos em Suspensão</b> ..... 43
<b>IV.3.2</b>	<b>Amostragem de Sedimentos do Leito</b> ..... 47
<b>IV.3.3</b>	<b>Amostragem de Sedimentos por Arraste</b> ..... 48

<b>V</b>	<b>USO DOS TRAÇADORES RADIOATIVOS NO ESTUDO DO MOVIMENTO DE SEDIMENTOS EM CÓRREGOS E RIBEIRÕES</b> .....	52
<b>V.1</b>	<b>O USO DOS TRAÇADORES RADIOATIVOS NO CÓRREGO VINTE E UM</b> .....	52
<b>V.1.1</b>	<b>Escolha do Traçador Injetado no Córrego Vinte e Um</b> .....	55
<b>V.1.1.1</b>	Experiências com ouro radioativo - Au <sup>198</sup> .....	56
<b>V.1.1.2</b>	Simulação do sedimento com vidro moído contendo Iridio .....	56
<b>V.1.2</b>	<b>Injeções Realizadas no Córrego Vinte e Um</b> .....	57
<b>V.1.3</b>	<b>Detecções Realizadas no Córrego Vinte e Um</b> .....	58
<b>V.2</b>	<b>CORREÇÕES AOS DADOS DE CAMPO</b> .....	59
<b>V.2.1</b>	<b>Transformação dos Dados para Contagens por Segundo</b> .....	59
<b>V.2.2</b>	<b>Correções das Contagens da Sonda 9 para Padronização do Posicionamento</b> .....	59
<b>V.2.3</b>	<b>Correção do Ruído de Fundo</b> .....	60
<b>V.2.4</b>	<b>Correções do Decaimento Radioativo</b> .....	60
<b>V.2.5</b>	<b>Correção da Eficiência das Sondas</b> .....	61
<b>V.2.6</b>	<b>Correção da Velocidade das Sondas</b> .....	61
<b>V.3</b>	<b>MÉTODO DO BALANÇO DAS TAXAS DE CONTAGEM</b> .....	61
<b>VI</b>	<b>RESULTADOS DOS ENSAIOS COM TRAÇADORES RADIOATIVOS E CÁLCULO DA DESCARGA SÓLIDA PELO MÉTODO DAS TAXAS DE CONTAGEM</b> .....	66
<b>VI.1</b>	<b>CÁLCULO DO CENTRO DE GRAVIDADE DA NUVEM RADIOATIVA</b> .....	66
<b>VI.2</b>	<b>ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS POSIÇÕES DAS PARTÍCULAS</b> .....	73
<b>VI.2.1</b>	<b>Valores Médios das Posições das Partículas</b> .....	73
<b>VI.2.2</b>	<b>Variâncias das Posições das Partículas</b> .....	73
<b>VI.3</b>	<b>VELOCIDADE MEDIA DE TRANSPORTE POR ARRASTE DE SEDIMENTOS DO CÓRREGO VINTE E UM</b> .....	80
<b>VI.4</b>	<b>TRAÇADO OU DESENHO DAS CURVAS DE ISOCONTAGENS</b> .....	80
<b>VI.5</b>	<b>ESPESSURA DE TRANSPORTE POR ARRASTE</b> .....	83
<b>VI.5.1</b>	<b>Medição Direta</b> .....	83
<b>VI.5.2</b>	<b>Determinação da Espessura de Transporte pelo Método do Balanço das Taxas de Contagem</b> .....	89
<b>VI.6</b>	<b>CÁLCULO DA DESCARGA SÓLIDA POR ARRASTE PELO MÉTODO DO BALANÇO DAS TAXAS DE CONTAGEM</b> .....	92
<b>VII</b>	<b>EXPRESSÕES UTILIZADAS PARA O CÁLCULO DA DESCARGA SÓLIDA DO MATERIAL DO LEITO</b> .....	94
<b>VII.1</b>	<b>PARCELA DAS GRANDEZAS HIDRODINÂMICAS RESPONSÁVEIS PELO MOVIMENTO DE SEDIMENTOS</b> .....	94
<b>VII.2</b>	<b>MÉTODO DE EINSTEIN</b> .....	96
<b>VII.3</b>	<b>MÉTODO DE VUKMIROVIĆ E VUKOTIĆ</b> .....	97
<b>VII.4</b>	<b>MÉTODO DE VAN RIJN</b> .....	98
<b>VII.4.1</b>	<b>Velocidade de Atrito Crítica, <math>u_{*c}</math></b> .....	99
<b>VII.4.2</b>	<b>Velocidade de Atrito Crítica do Grão, <math>u'_{*c}</math></b> .....	100
<b>VII.5</b>	<b>EQUAÇÃO DAS DUNAS E RUGAS</b> .....	102

		Páginas
VIII	CÁLCULO DA DESCARGA SÓLIDA POR ARRASTE E EM SUSPENSÃO .....	106
VIII.1	CAMPANHA INTENSIVA DE MEDIDAS .....	106
VIII.2	REGIMES HIDROSEDIMENTOLÓGICOS OCORRIDOS DURANTE OS ENSAIOS COM TRAÇADORES RADIOATIVOS .....	109
VIII.3	PARCELAS DAS GRANDEZAS HIDRODINÂMICAS RESPONSÁVEIS PELO MOVIMENTO DE SEDIMENTO .....	111
VIII.4	ESTIMATIVA DA DESCARGA SÓLIDA POR ARRASTE PELO MÉTODO DE EINSTEIN .....	115
VIII.4.1	Cálculo dos Valores da Função Intensidade de Corrente, $\Psi$ .....	115
VIII.4.2	Cálculo dos Valores da Função Intensidade de Transporte, $\Phi$ .....	116
VIII.4.3	Cálculo dos Valores das Descargas Sólidas por Unidade de Largura, $q_{bi}$ , de cada classe granulométrica do material do leito e total, $q_b$ .....	116
VIII.4.4	Comparação dos Resultados Obtidos pelo Método de Einstein e Medidos com Traçadores Radioativos .....	120
VIII.5	ESTIMATIVA DA DESCARGA SÓLIDA POR ARRASTE PELO MÉTODO DE VUKMIROVIĆ E VUKOTIĆ .....	121
VIII.6	ESTIMATIVA DA DESCARGA SÓLIDA POR ARRASTE PELO MÉTODO DE VAN RIJN .....	129
VIII.7	ESTIMATIVA DA DESCARGA SÓLIDA POR ARRASTE PELA EQUAÇÃO DAS DUNAS E RUGAS .....	131
VIII.8	DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO NO CÓRREGO VINTE E UM .....	132
VIII.9	OBSERVAÇÕES .....	137
IX	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	139
	BIBLIOGRAFIA .....	152

## LISTA DE FIGURAS

		Páginas
Figura II.1	Mapas de localização da área de estudo .....	6
Figura II.2.	Erosão laminar.....	12
Figura II.3.	Terreno de cultura com sulcos de erosão.....	12
Figura II.4.	Terreno de encosta com sulcos.....	12
Figura II.5.	Voçoroca em Latossolo Vermelho-Escuro. Valparaíso, SP .....	12
Figura II.6	Voçoroca na periferia da cidade de Paranavaí em 1963 .....	12
Figura II.7.	Erosão na região urbana, município de Icaraíma, Noroeste do Paraná.....	13
Figura II.8.	Erosão na região rural, município de Icaraíma, Noroeste do Paraná.....	14
Figura II.9	Curso do córrego Vinte e Um. Google Earth, 2013.....	16
Figura II.10	Sub-bacia do córrego Vinte e Um. Carta IBGE – Folha de Tapira .....	17
Figura III.1	Metodologia adotada nos estudos hidrossedimentométricos do córrego Vinte e Um .....	18
Figura III.2	Trecho representativo e seção de medidas do córrego Vinte e Um .....	20
Figura III.3	Relação das medições realizadas na sub-bacia do córrego Vinte e Um, no trecho representativo e proximidade da fazenda Vitória: ano 1974.....	23
Figura III.4	Relação das medições realizadas na sub-bacia do córrego Vinte e Um, no trecho representativo e proximidade da fazenda Vitória: ano 1975.....	24
Figura IV.1	Cotogramas e alturas diárias de chuva nas seções das réguas.....	26
Figura IV.2	Comparação entre as cotas linimétricas das réguas N°1 e N°2 .....	27
Figura IV.3	Comparação entre as cotas linimétricas das réguas N°1 e N°3 .....	27
Figura IV.4	Comparação entre as cotas linimétricas das réguas N°2 e N°3 .....	28
Figura IV.5	Esquema da topografia do trecho representativo do córrego Vinte e Um .....	28
Figura IV.6	Representação da topografia do trecho de estudos do córrego Vinte e Um.....	29
Figura IV.7	Esquema do levantamento topográfico das réguas linimétricas .....	30
Figura IV.8	Níveis topográficos médios diários e alturas diárias de chuva .....	30
Figura IV.9	Níveis topográficos médios diários com Régua N°3 corrigida e alturas diárias de chuva.....	32
Figura IV.10	Correlação entre os valores de cotas topográficas das Réguas N°1 e N°2 .....	32
Figura IV.11	Correlação entre os valores de cotas topográficas das Réguas N°1 e N°3 .....	33
Figura IV.12	Correlação entre os valores de cotas topográficas das Réguas N°2 e N°3 .....	33
Figura IV.13	Exemplo de planilha EXCEL para cálculo da vazão líquida.....	34
Figura IV.14	Relação entre cota e vazão do Córrego Vinte e Um .....	38
Figura IV.15	Comparação entre os valores de vazões líquidas estimadas e observada .....	39
Figura IV.16	Valores de vazões líquidas estimada mediante MAG.....	40
Figura IV.17	Estimativa da vazão líquida para o ciclo hidrológico .....	42
Figura IV.18	Relação da cota com a velocidade média .....	42
Figura IV.19	Desenho do amostrador de sedimentos do tipo USDH-48 integrador na vertical, usado para amostrar sedimento em suspensão.....	44
Figura IV.20	Análise das amostras de sedimentos do córrego Vinte e Um .....	46
Figura IV.21	Desenho do amostrador do tipo “Rock Island” para sedimento do leito .....	47
Figura IV.22	Amostrador de sedimento em movimento por arraste.....	49
Figura V.1	Trecho representativo do córrego Vinte e Um.....	53
Figura V.2	Esquema de posicionamento das sondas no trecho representativo do Córrego Vinte e Um.....	54
Figura V.3	Região de detecção delimitada pelos colimadores de chumbo .....	54

	Páginas
Figura V.4	Aparelho injetor utilizado no Córrego Vinte e Um ..... 58
Figura V.5	Princípio do Método do Balanço das Taxas de Contagem ..... 63
Figura VI.1	Área transversal $n_i$ , em cps x m ..... 67
Figura VI.2	Exemplo de diagrama de transporte ..... 67
Figura VI.3	Número total de contagens N (cps x m <sup>2</sup> ) em função do tempo ..... 68
Figura VI.4	Esquema de determinação do centro de gravidade ..... 69
Figura VI.5	Variação da posição do centro de gravidade na primeira experiência, com Au <sup>198</sup> ..... 70
Figura VI.6	Variação da posição do centro de gravidade na segunda experiência, com Au <sup>198</sup> ..... 70
Figura VI.7	Variação da posição do centro de gravidade na terceira experiência, com Ir <sup>192</sup> ..... 71
Figura VI.8	Variação temporal da posição longitudinal da média e moda da nuvem radioativa, 1ª Experiência ..... 77
Figura VI.9	Variação temporal da posição longitudinal da média e moda da nuvem radioativa, 2ª Experiência ..... 77
Figura VI.10	Variação temporal da posição longitudinal da média e moda da nuvem radioativa, 3ª Experiência ..... 78
Figura VI.11	Variação temporal da variância das posições longitudinais das partículas, 1ª Experiência ..... 78
Figura VI.12	Variação temporal da variância das posições longitudinais das partículas, 2ª Experiência ..... 79
Figura VI.13	Variação temporal da variância das posições longitudinais das partículas, 3ª Experiência ..... 79
Figura VI.14	Curvas de isocontagens da primeira detecção – primeira experiência Au198 ..... 81
Figura VI.15	Curvas de isocontagens da décima detecção – primeira experiência Au198 ..... 81
Figura VI.16	Curvas de isocontagens da vigésima detecção – primeira experiência Au198 ..... 82
Figura VI.17	Curvas de isocontagens da trigésima detecção – primeira experiência Au198 ..... 82
Figura VI.18	(a) Amostrador de sedimentos em profundidade e (b) aparelho para cortar as amostras em fatias, nomeado “guilhotina” ..... 84
Figura VI.19	Atividade específica média na margem esquerda do Córrego Vinte e Um, em função da profundidade ..... 85
Figura VI.20	Atividade específica média no eixo longitudinal central do Córrego Vinte e Um, em função da profundidade ..... 85
Figura VI.21	Atividade específica média na margem direita do Córrego Vinte e Um, em função da profundidade ..... 86
Figura VI.22	Distribuição das atividades específicas em função da profundidade, em cpm/g ..... 87
Figura VII.1	Algoritmo para o cálculo das variáveis reduzidas, utilizando-se os métodos de EINSTEIN-BARBAROSSA ou de EINSTEIN-KEULEGAN ..... 95
Figura VII.2	Movimento Incipiente do Grão segundo VAN RIJN ..... 100
Figura VIII.1	Curvas granulométricas dos traçadores radioativos injetados no Córrego Vinte e Um ..... 110
Figura VIII.2	Fator de correção de EINSTEIN, $X(D_{65}/\delta)$ ..... 112
Figura VIII.3	Previsões das formas de fundo do Córrego Vinte e Um utilizando o Gráfico de ENGELUND ..... 114
Figura VIII.4	Exemplo do Registro das Configurações de Fundo do Córrego Vinte e Um ..... 114
Figura VIII.5	Comparação das estimativas da descarga sólida por unidade de largura obtidas pelo Método de Einstein, com as medições de traçadores radioativos ..... 121
Figura VIII.6	Curvas de $\Phi^{1/b}$ em função de $\theta'$ para os regimes hidrossedimentométricos observados durante a primeira experiência com Au <sup>198</sup> ..... 124
Figura VIII.7	Curvas de $\Phi^{1/b}$ em função de $\theta'$ para os regimes hidrossedimentométricos observados durante a segunda experiência com Au <sup>198</sup> ..... 125

	Páginas	
Figura VIII.8	Curvas de $\Phi 1/b$ em função de $\theta'$ para os regimes hidrossedimentométricos observados durante a experiência com Ir192..... 125	125
Figura VIII.9	Comparação das estimativas da descarga sólida por unidade de largura obtidas pelo Método de Vukmirovic' e Vukotic', com as medições de traçadores radioativos..... 128	128
Figura VIII.10	Comparação das estimativas da descarga sólida por unidade de largura obtidas pelo Método de Van Rijn, com as medições com traçadores radioativos ..... 131	131
Figura VIII.11	Concentração de sedimentos em suspensão em função da vazão líquida obtidos durante a Campanha de Medições Periódicas ..... 133	133
Figura VIII.12	Séries de dados diários de concentração de sedimentos em suspensão e intensidade de chuva durante o ciclo hidrológico de 08/07/74 a 07/07/75 ..... 134	134
Figura VIII.13	Descargas sólidas em suspensão, diárias e acumuladas..... 136	136
Figura VIII.14	Curva de massa do Córrego Vinte e Um na estação de Fazenda Vitória..... 137	137
Figura IX.1	Área da seção de medidas em função da cota do nível d'água do Córrego Vinte e Um, no trecho da Fazenda Vitória ..... 142	142
Figura IX.2	Perfis transversais da seção de medidas do Córrego Vinte e Um para a mesma cota do nível d'água ( $Z = 0,27$ m) ..... 143	143
Figura IX.3	Comparação dos resultados das descargas sólidas por arraste, por unidade de largura, obtidas pelos métodos clássicos e dos traçadores radioativos ..... 149	149
Figura IX.4	Movimento de sedimentos em escoamentos com superfície livre ..... 151	151

## LISTA DE TABELAS

	Páginas
Tabela II.1	Produção de seis produtos selecionados e sua relação com a produção total do Estado na década de setenta ..... 8
Tabela II.2	Exportações da Região Noroeste em relação ao Estado do Paraná e ao Brasil ..... 8
Tabela II.3	Sub-bacias do Rio Ivaí, caracterizando diferentes tipos e usos de solos. .... 15
Tabela IV.1	Valores das leituras topográfica das régua linimétricas ..... 29
Tabela IV.2	Declividades médias entre as três régua ..... 34
Tabela IV.3	Valores de Vazão líquida para o Córrego Vinte e Um ..... 36
Tabela IV.4	Comparação entre as equações de curva chave ..... 38
Tabela IV.5	Concentrações de sedimento em suspensão do córrego Vinte e Um ..... 45
Tabela IV.6	Valores dos diâmetros característicos (mm) para o sedimento em suspensão ..... 47
Tabela IV.7	Diâmetros característicos do sedimento do leito, do córrego Vinte e Um ..... 49
Tabela IV.8	Diâmetros característicos do sedimento em movimento por arraste ..... 50
Tabela IV.9	Cálculo direto do transporte por arraste ..... 51
Tabela V.1	Principais traçadores radioativos utilizados em sedimentologia ..... 55
Tabela V.2	Injeções realizadas no córrego Vinte e Um ..... 57
Tabela V.3	Detalhe das detecções realizadas no córrego Vinte e Um ..... 58
Tabela V.4	Valores de correção da eficiência ..... 61
Tabela V.5	Valores dos parâmetros $\alpha$ , $\beta$ e $f_0$ ..... 64
Tabela VI.1	Coordenadas do centro de gravidade – Primeira Injeção Au <sup>198</sup> ..... 71
Tabela VI.2	Coordenadas do centro de gravidade – Segunda Injeção Au <sup>198</sup> ..... 72
Tabela VI.3	Coordenadas do centro de gravidade – Terceira Injeção Ir <sup>192</sup> ..... 73
Tabela VI.4	Valores estatísticos da posição das partículas radioativas, primeira experiência com Au <sup>198</sup> ..... 74
Tabela VI.5	Valores estatísticos da posição das partículas radioativas, segunda experiência com Au <sup>198</sup> ..... 75
Tabela VI.6	Valores estatísticos da posição das partículas radioativas, terceira experiência com, Ir <sup>192</sup> ..... 76
Tabela VI.7	Velocidade resultante do centro de gravidade da nuvem radioativa ..... 80
Tabela VI.8	Valores médios da espessura da camada de transporte ..... 88
Tabela VI.9	Valores estimados da espessura de transporte ..... 91
Tabela VI.10	Valores dos parâmetros utilizados para o cálculo da descarga sólida por arraste ..... 93
Tabela VIII.1	Variáveis Hidrodinâmicas obtidas durante as Medições de Vazão Líquida do Córrego Vinte e Um ..... 107
Tabela VIII.2	Valores das declividades do eixo longitudinal do Córrego Vinte Um, obtidos durante as detecções do traçador radioativo ..... 108
Tabela VIII.3	Regimes hidrossedimentológicos do Córrego Vinte e U, ocorridos durante os ensaios com traçadores radioativos ..... 110
Tabela VIII.4	Valores das variáveis hidrossedimentológicas reduzidas ..... 112
Tabela VIII.5	Valores da intensidade de corrente, $\Psi$ , em função do diâmetro do grão de sedimento do Córrego Vinte e Um. .... 117
Tabela VIII.6	Valores da intensidade de transporte, $\Phi$ , em função do diâmetro do grão de sedimento do Córrego Vinte e Um ..... 118
Tabela VIII.7	Valores da descarga sólida por unidade de largura, $q_b$ , em função do diâmetro do grão de sedimento do Córrego Vinte e Um ..... 119

	Páginas
Tabela VIII.8	Valores reduzidos da função intensidade de transporte utilizados no cálculo da descarga sólida por unidade de largura pelo método de VUKMIROVIC' e VUKOTIC' ..... 123
Tabela VIII.9	Valores usados para o ajuste da Equação de Vukmirovic' e Vukotic' aos dados hidrossedimentométricos do Córrego Vinte e Um..... 126
Tabela VIII.10	Descargas sólidas por unidade de largura estimadas pelo método de VUKMIROVIC' e VUKOTIC' ..... 127
Tabela VIII.11	Estimativas das descargas sólidas por unidade de largura pelo método de VAN RIJN 130
Tabela IX.1	Estimativas da descarga sólida por unidade de largura do Córrego Vinte e Um, em Fazenda Vitória 146
Tabela IX.2	Desvios percentuais das estimativas da descarga sólida média por unidade de largura do Córrego Vinte e Um, em relação aos resultados obtidos com traçadores radioativos ..... 147

## LISTA DE SIMBOLOS

Símbolos	Descrições	Dimensões
A	Área da seção transversal Atividade do traçador no momento da injeção	$L^2$ Bq ou Ci
a	Constante	-
B	Largura da seção transversal	L
b	Constante	-
CD	Coefficiente de arraste	-
$C_{t_{det}}$	Taxa de contagem no instante $t_{det}$ da detecção	$CT^{-1}$
$C_{t_0}$	Taxa de contagem no instante $t_0$ da injeção	$CT^{-1}$
$C_0$	Concentração máxima do material do leito	-
$C'$	Coefficiente de Chézy relativo ao grão de sedimento	-
$c_i$	Taxa de contagens radioativas por unidade de massa de sedimento	$CM^{-1}T^{-1}$
$c_b$	Concentração do material do leito	-
$D_i$	Diâmetro característico do sedimento. Corresponde ao diâmetro em peso dos grãos que compõem as amostras de sedimento, tal que $i\%$ possuem dimensões inferiores a esse valor correspondente.	L
$D_*$	Parâmetro adimensional da partícula (VAN RIJN, 1984a)	-
d	Profundidade da linha de água	L
E	Espessura da camada ativa do transporte por arraste	L
$F_D$	Força de arraste	F
$F_g$	Força descendente, o peso	F
$F_L$	Força de sustentação	F
$f$	Fator perda de carga	-
$fb$	Fator cisalhamento relativo ao fundo	-
$fw$	Fator cisalhamento relativo às paredes	-
$f_0$	Constante que caracteriza o nível de resposta da sonda ao traçador em função da profundidade	$CL^2T^{-1}Ci^{-1}$
g	Aceleração de gravidade	$LT^{-2}$
$h_d$	Altura das configurações do leito	L
h	Cota do nível da água	L
$h_0$	Cota do nível de água (h) para o qual a vazão é zero	L
K	Constante	-
k	Constante de von Karman	-
$k_s$	Altura equivalente de Nikuridse	L
$\ell$	Comprimento longitudinal do escoamento	L
L	Largura da nuvem radioativa	L
m	Massa da partícula de sedimento	M
N	Número total de contagens recuperadas	$CL^2T^{-1}$
$n_i$	Taxa de contagem para a $i$ -ésima seção transversal	$CL^2T^{-1}$
$n_j$	Taxa de contagem para a $j$ -ésima seção longitudinal	$CL^2T^{-1}$
p	Número de seções transversais $n_i$ da nuvem radioativa	-
$Q_b$	Descarga sólida mássica por arraste	$MT^{-1}$
$Q_{est}$	Vazão líquida estimada	$L^3T^{-1}$
$Q_{obs}$	Vazão líquida observada	$L^3T^{-1}$
$q_b$	Descarga sólida por arraste por unidade de largura	$ML^{-1}T^{-1}$
R	Raio hidráulico	L
Rb	Raio hidráulico com correção de parede do leito	L
Re	Número adimensional de Reynolds	-
S	Declividade da linha d'água	-

<b>Símbolos</b>	<b>Descrições</b>	<b>Dimensões</b>
$s_i$	Função não linear desconhecida	-
$s$	Densidade específica ( $\rho_s / \rho$ )	-
$T$	Parâmetro adimensional de transporte (VAN RIJN, 1984a)	-
$T_{1/2}$	Meia Vida do traçador radioativo	T
$t_0$	Instante de tempo da injeção	T
$u_b$	Velocidade da partícula segundo VAN RIJN (1984a)	$LT^{-1}$
$U$	Velocidade média do escoamento	$LT^{-1}$
$u'_*$	Velocidade de atrito relativo ao grão de sedimento	$LT^{-1}$
$u_*$	Velocidade de atrito	$LT^{-1}$
$u_{*,cr}$	Velocidade de atrito crítica, segundo SHIELDS (1932)	$LT^{-1}$
$V_r$	Velocidade da partícula relativa ao fluido	$LT^{-1}$
$V_d$	Velocidade de deslocamento das configurações de fundo	$LT^{-1}$
$V_s$	Velocidade de deslocamento da nuvem radioativa	$LT^{-1}$
$X_{cg(t)}$	Coordenada longitudinal do centro de gravidade num instante t	L
$Y_{cg(t)}$	Coordenada transversal do centro de gravidade num instante t	L
$\Psi$	Função adimensional da intensidade da corrente definida por EINSTEIN (1950)	-
$\Phi$	Função adimensional da intensidade do transporte definida por EINSTEIN (1950)	-
$\alpha$	Constante	-
$\alpha_m$	Coefficiente de adição de massa	-
$\alpha_L$	Coefficiente de sustentação	-
$\beta$	Constante que caracteriza a distribuição do traçador em profundidade	-
$\gamma_s$	Peso específico do sedimento	$ML^{-2}T^{-2}$
$\gamma'_s$	Peso específico do sedimento submerso	$ML^{-2}T^{-2}$
$\gamma$	Peso específico da água	$ML^{-2}T^{-2}$
$\delta$	Espessura da camada laminar	L
$\delta_b$	Altura do salto duma partícula segundo VAN RIJN (1984a)	L
$\varepsilon$	Valor de erro do ajuste	-
$\mu$	Coefficiente de viscosidade dinâmica	-
$\nu$	Viscosidade cinemática da água	$L^2T^{-1}$
$\rho'_s$	Massa específica do sedimento submerso	$ML^{-3}$
$\rho$	Massa específica da água	$ML^{-3}$
$\rho_s$	Massa específica do sedimento	$ML^{-3}$
$\sigma_1$	Coefficiente de uniformidade	-
$\sigma_2$	Coefficiente de gradação	-
$\theta$	Tensão tangencial normalizada	-
$\theta_0$	Tensão tangencial crítica normalizada	-
$\theta_{*,cr}$	Tensão tangencial crítica no fundo	-
$\omega$	Velocidade angular da partícula	$LT^{-1}$

## ANEXOS

ANEXO 1 **Pluviometria.xlsx**

ANEXO 2 **Vazão.xlsx**

ANEXO 3 **Sedimentos.xlsx**

ANEXO 4 **1ºInjeção.xlsx**

**1ºInjeção.srf**

**2ºInjeção.xlsx**

**2ºInjeção.srf**

**3ºInjeção.xlsx**

**3ºInjeção.srf**

ANEXO 5 **Batimetria1.xlsx**

**Batimetria2.xlsx**

**Batimetria3.xlsx**

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

A determinação das descargas sólidas de sedimentos por arraste é fundamental na realização de estudos em diversas áreas da Engenharia, tais como Navegação Fluvial e Marinha, obras para hidroelétricas e abastecimento d'água, saneamento, portuárias, recreação e turismo. O movimento por arraste altera a morfologia dos ambientes fluvial, estuarino, costeiro e marinho. Assim, pesquisadores têm trabalhado no desenvolvimento de fórmulas matemáticas que permitam descrever o movimento de sedimentos por arraste. Fórmulas como a de EINSTEIN (1950), ENGELUND-HANSEN (1967), MEYER-PETER MULLER (1948) ou VAN RIJN (1984a) padronizam as condições dos ambientes fluviais de forma que seja possível explicar o movimento de sedimentos. A principal motivação desta tese corresponde à aplicação e aperfeiçoamento de uma metodologia, que aplicada aos estudos dos escoamentos com superfície livre, permite ajustar as fórmulas do movimento de sedimentos às características do escoamento, determinadas na natureza.

Entre os anos 1974 e 1975 foram realizadas na Região Noroeste do Estado do Paraná, uma série de trabalhos hidráulico-sedimentológicos em quatro sub-bacias do Rio Ivaí, com a finalidade de avaliar de que forma diferentes tipos e usos de solo da Região Noroeste do Estado do Paraná influem no movimento de sedimentos. Esta região sofreu acelerados crescimentos econômico e demográfico acelerado desde a primeira metade do século passado, gerando um processo erosivo que afetou diretamente as cidades e as atividades agrícola e pecuária. Na década de 1970, a bacia do Rio Ivaí foi inserida no projeto “Medida da Massa de Sedimento Transportado por Rios da Bacia da Prata” (WILSON-JR., RODRIGUES e SANTOS, 1974) financiado pela OEA (Organização de Estados Americanos). Delimitados dentro deste projeto, foram realizados trabalhos de campo no Rio Ivaí e em quatro de suas sub-bacias, cada uma representativa dum tipo e uso particular do solo. Uma destas sub-bacias é a do Córrego Vinte e Um cujo tipo de solo é o arenito Caiuá e a ocupação principal é a pecuária.

Com os dados levantados nos estudos das quatro sub-bacias, já foram apresentadas duas teses de mestrado: a Engenheira Monica da Hora (DAHORA, 1996) apresentou a tese intitulada “Avaliação do Transporte de Sólidos na Sub-bacia do

Ribeirão do Rato. Região Noroeste do Estado do Paraná” e a Engenheira Renata Nery (NERY, 2002) apresentou a tese “Estimativa do Transporte e Dispersão de Sedimentos com Uso de Métodos Clássicos e Radioativos: Aplicação na Sub-Bacia do Córrego Horácio/Noroeste do Estado do Paraná”, no ano 2002.

Nesta dissertação serão utilizados parte dos dados correspondentes à sub-bacia do Córrego Vinte e Um. Cabe destacar que os dados obtidos nos trabalhos de campo realizados no Rio Ivaí representam um acervo valioso de dados para pesquisa sedimentológica, principalmente devido à dificuldade de obtenção de dados confiáveis com os quais se possa validar e calibrar as fórmulas sobre o movimento de sedimento.

## **I.1 OBJETIVOS**

### **I.1.1 Objetivo principal**

Aplicação e aperfeiçoamento de metodologia desenvolvida no Brasil sobre o estudo do movimento de sedimentos em escoamentos com superfície livre com utilização de métodos hidrossedimentométricos clássicos e com traçadores radioativos.

### **I.1.2 Objetivos secundários**

- Uso de técnicas de medições especiais diretas do movimento de sedimentos em cursos d’água, com traçadores radioativos, e levantamentos topobatimétricos, incluindo o registro das configurações de fundo.
- Determinação das características médias diárias hidráulicas e sedimentológicas do Córrego Vinte e Um.
- Determinações qualitativas e quantitativas do movimento de sedimentos do Córrego Vinte e Um.
- Calibração e validação das equações analíticas de EINSTEIN (1950), VUKMIROVIĆ e VUKOTIĆ (1981), de VAN RIJN (1984b) e da Equação das Dunas e Rugas (SIMONS *et al.*, 1965), com uso de traçadores radioativos.

## I.2 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A organização do texto a partir do capítulo seguinte será apresentada de forma resumida a seguir.

No **Capítulo II, “Processo Erosivo na Região Noroeste do Paraná”**, apresentaram-se os antecedentes dos trabalhos realizados na Região Noroeste do Paraná. A história da colonização da região, assim como sua importância econômica, em meados do século passado, são resumidos de forma a poder-se entender os componentes geradores do processo erosivo na região. Delimita-se a região de estudo e apresenta-se a sub-bacia, da qual foram extraídos os dados utilizados nesta dissertação.

No **Capítulo III** apresenta-se a **“Metodologia”** que foi utilizada na obtenção dos dados originais do Córrego Vinte e Um. O tratamento dos dados realizado posteriormente relaciona-se diretamente com as etapas da metodologia descrita neste capítulo. A metodologia é indicada para a realização de estudos hidrossedimentológicos em escoamentos com superfície livre. No final do Capítulo III apresenta-se a relação dos dados obtidos no Córrego Vinte e Um.

Os dados obtidos de acordo com a metodologia apresentada no capítulo III são analisados no **Capítulo IV: “Tratamento dos Dados de Campo das Campanhas Hidrossedimentométricas”**, onde se revisa as etapas do tratamento de dados. Este tratamento é indispensável para se obter os valores das variáveis que serão inseridos nos modelos analíticos de transporte de sedimento. Neste Capítulo IV listam-se os dados das campanhas de medições realizadas no Córrego Vinte e Um.

Os dados gerados nas campanhas intensivas, com traçadores radioativos, são tratados no **Capítulo V: “Uso dos Traçadores Radioativos no Estudo do Movimento de Sedimento em Córregos e Ribeirões”**. Após a introdução dos conceitos teóricos que regem o emprego de traçadores radioativos em Recursos Hídricos, descrevem-se os equipamentos e técnicas adotadas no Córrego Vinte e Um.

Utilizou-se o Método do Balanço das Taxas de Contagem para o tratamento dos dados obtidos com traçadores radioativos. Este tratamento exigiu uma série de correções dos valores obtidos com a finalidade de padronizar os dados, permitindo comparar as três experiências realizadas no Córrego Vinte e Um.

Realizadas as correções dos valores obtidos nos ensaios com traçadores radioativos, apresentam-se no **Capítulo VI: “Resultados dos ensaios com traçadores**

**radioativos e cálculo da descarga sólida usando o Método do Balanço das Taxas de Contagem**”, os procedimentos necessários para realizar o cálculo da descarga sólida.

Descrevem-se neste capítulo, detalhadamente, os procedimentos necessários para a obtenção dos valores das grandezas da Equação do Balanço das Taxas de Contagem. São apresentadas, entre outras, as curvas de iso-contagens e os cálculos das posições do centro de gravidade utilizadas para a determinação da velocidade de transporte de sedimentos. Para cada experiência, foram determinados três valores da descarga sólida por arraste, em função dos valores mínimo, médio e máximo, medidos da espessura de transporte.

Os valores da descarga sólida por arraste no Córrego Vinte e Um obtidos com radioisótopos, fazem parte das conclusões do capítulo e desta dissertação de mestrado. Eles foram usados para calibração das expressões de EINSTEIN (1950), VUKMIROVIC' e VUKOTIC' (1981), e VAN RIJN (1984a).

No **Capítulo VII: “Expressões utilizadas para o cálculo da descarga sólida do material do leito”**, foram apresentadas, detalhadamente, as etapas dos desenvolvimentos analíticos das expressões matemáticas utilizadas para o cálculo da descarga sólida por arraste. As fórmulas utilizadas foram as de: EINSTEIN (1950), VUKMIROVIĆ e VUKOTIĆ (1981), de VAN RIJN (1984b) e da Equação das Dunas e Rugas (SIMONS *et al.*, 1965). Destaca-se a apresentação didática da expressão de VAN RIJN (1984a), o que facilitou sua compreensão e aplicação.

O **Capítulo VIII: “Cálculo da descarga sólida por arraste e em suspensão”**, corresponde aos resultados dos cálculos desenvolvidos para determinação da descarga sólida. Apresentaram-se os procedimentos que foram adotados para cada expressão e os resultados ajustados aos dados obtidos das medições com traçadores radioativos.

Para os cálculos efetuados, foram considerados 18 regimes hidrossedimentológicos do Córrego Vinte e Um, no trecho Fazenda Vitória, caracterizados por valores medidos da declividade do eixo longitudinal do leito do rio, do raio hidráulico da seção de medições e da velocidade média através desta seção. Estes regimes foram observados durante os ensaios com traçadores radioativos.

O **Capítulo IX** corresponde às **“Conclusões e Recomendações”** que foram extraídas tanto do resultado final, quanto da metodologia utilizada.

Os resultados mostraram que os métodos clássicos seguem as tendências hidrossedimentológicas do trecho do Córrego Vinte e Um, ou seja, os mesmos sentidos

das variações observadas com traçadores radioativos. As equações do transporte sólido, que caracterizam os métodos de EINSTEIN (1950), VUKMIROVIC'-VUKOTIC' (1981) e VAN-RIJN (1984a), podem ser ajustadas aos resultados obtidos dos ensaios com traçadores radioativos, ou seja, suas equações podem ser calibradas para permitir que os resultados sejam próximos daqueles medidos experimentalmente no Córrego Vinte e Um.

Para isto, recomenda-se que seja utilizada a Metodologia apresentada por ECKHARDT e WILSON-JR. (1998); ECKHARDT (1998) e WILSON-JR. (1999). A aplicação do Método de VUKMIROVIC' e VUKOTIC' (1981) adotada nesta dissertação, confirma que bons resultados podem ser esperados com a adoção desta metodologia.

A **Bibliografia** relaciona as publicações consultadas no desenvolvimento da dissertação.

Em **Anexos**, estão listadas as planilhas com os dados hidráulicos e sedimentológicos, clássicos e com traçadores radioativos, os quais, juntamente com a dissertação em pdf, foram disponibilizados num CD-ROM.

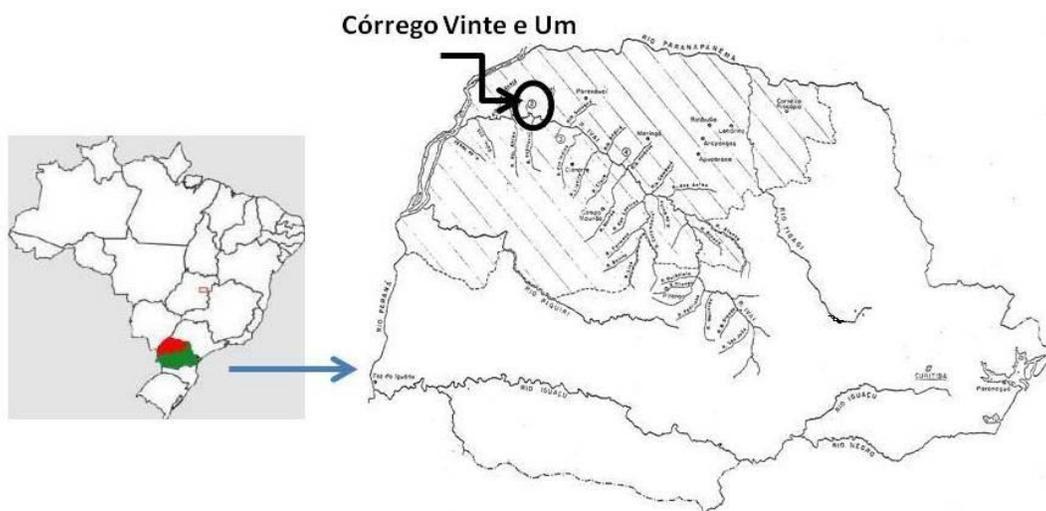
## CAPÍTULO II

### PROCESSO EROSIVO NA REGIÃO NOROESTE DO PARANÁ

#### II.1 REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DO PARANÁ

O Estado do Paraná se localiza na Zona Sul do Brasil, cuja superfície é 199.314 km<sup>2</sup>, que corresponde a 2,3 % da superfície total do país. Na atualidade, o Estado conta com 399 municípios instalados, segundo o site do Governo do Estado, com base nos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE (Censo 2012). A Região Noroeste está localizada dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Paraná, tendo como limite Norte o Rio Paranapanema, linha divisória com o Estado de São Paulo, e como limite Sul o Rio Piquiri. A Oeste tem-se o Rio Paraná, fronteira com o Estado do Mato Grosso do Sul. A superfície desta região abrange cerca de 50.000 km<sup>2</sup> (NERY, 2002) de topografia relativamente plana, com colinas baixas separadas por vales amplos. A formação é conhecida como o Terceiro Planalto Paranaense.

A Região Noroeste tem 61 municípios estabelecidos. O Córrego Vinte e Um é um efluente da margem direita do Rio Ivaí. Administrativamente, encontra-se na sub-região denominada Paranaíba, no município de Santa Isabel do Ivaí (IBGE, 2013). Na **Figura II.1**, apresenta-se a localização da área de estudo.



**Figura II.1 – Mapa de localização da área de estudo**

### **II.1.1 Caracterização Histórica da Região Noroeste**

A história do Noroeste do Estado do Paraná, do ponto de vista da ocupação do território, iniciou-se no século XVI, com a disputa desta região brasileira pelos portugueses, castelhanos e bandeirantes paulistas. Nessa data foram registradas as primeiras investidas européias no território, por caminhos fluviais e picadas abertas na floresta a facão. Porém, muitas trilhas cruzavam a região de Leste a Oeste, e eram usadas pelos habitantes indígenas da região, como o Caminho do Peabiru ou de São Tomé (HARACENKO, 2007).

O processo chamado de “Ocupação” do território, que começou no início do século passado, dá a entender que a região estava desabitada, o que não é correto, já que existia na região uma importante população indígena, conhecida como os Xetá (HARACENKO, 2007. IBGE). Este povo foi despojado, paulatinamente, dos territórios com a chegada de fazendeiros mineiros e paulistas, à procura de terras para o plantio de café.

No ano 1925, na Inglaterra, fundou-se uma empresa de capital britânico de nome “Paraná Plantations Limited” que, através da sua filial no Brasil, “Companhia de Terras Norte do Paraná”, adquiriu do Governo do Estado e de posseiros, uma gleba de 1.250.000 hectares da região que era conhecida como Norte Novo, que foi dividida em parcelas e revendidas a novos colonos chegados à região (SUDESUL, 1972).

A partir de 1940, a chegada de novos colonos acelerou-se, promovida pela expansão da produção do café. Os colonos ocuparam inicialmente a microrregião de Norte Velho de Jacarésinho, cuja população, praticamente, duplicou entre os anos 1920 a 1940 (CAVALCANTI, 2007). A região ainda apresentava uma estrutura de grandes fazendas, mas o crescimento populacional, e o incentivo do governo do estado, provocaram a fragmentação das grandes fazendas em pequenas e médias propriedades, diversificando a produção agrícola.

Assim, a demanda internacional de café, a chegada de novos colonos e a subdivisão da propriedade agrícola, gerou um rápido desenvolvimento da região e a fundação, por parte do governo do estado, de novos centros urbanos, como Içara, Jaguapitã, Centenário, Interventor Braga e Paranaíba. Estas colônias foram planejadas muito próximas das terras da Companhia Melhoramentos Norte do Paraná, para assim, facilitar a colonização, com as estradas, via férrea e as cidades já existentes na região.

## II.1.2 A Região Noroeste do Paraná em Relação ao Estado e à Nação

Embora o Noroeste do Estado de Paraná represente um terço da área física do Estado, na década de 70 esta área continha a metade da população e era responsável pela metade da economia estadual (SUDESUL,1974). Em muitos aspectos, como exportações e áreas de cultura permanente, chegou a representar a totalidade das divisas do Estado.

A **Tabela II.1** mostra a participação do Noroeste do Estado do Paraná na produção total do Estado em seis produtos agrícolas, que representaram, a nível estadual, aproximadamente dois terços do valor de toda a produção agrícola na década de setenta (SUDESUL,1974).

**Tabela II.1 – Produção de seis produtos selecionados e sua relação com a produção total do Estado na década de setenta. IBGE (1970) apud NERY (2002)**

Produto (toneladas)	Noroeste do Paraná	Estado do Paraná	%
Café	84.181	116.900	72,01
Algodão	390.751	397.063	98,41
Milho	1.350.757	3.426.389	39,42
Feijão	225.258	457.096	49,28
Arroz	231.759	375.605	61,70
Soja	257.557	411.642	62,57

Cabe ressaltar que, na década de 1960-1970, o Noroeste do Paraná gerou em média 80% das divisas totais do Estado (SUDESUL,1974). Estas divisas foram, em grande parte, geradas pelas exportações do setor agropecuário, e mais especificamente pela produção cafeeira. As exportações da região, nessa década, representaram um aporte importante em crescimento, dos valores totais da Nação, como se pode constatar na **Tabela II.2**.

**Tabela II.2 – Exportações da Região Noroeste em relação ao Estado do Paraná e ao Brasil**

Anos	I Brasil	II Paraná	III Noroeste	% II/I	% III/I	% III/II
1960	1.269.000	57.073	44.289	4,5	3,5	77,6
1965	1.595.500	131.110	106.362	8,2	6,7	81,1
1970	2.700.000	412.330	335.081	15,3	12,4	81,3

Dados do IBGE, DEE, BADEP (SUDESUL, 1974)(Valores em US\$ 1.000)

Embora se considere que a economia do Noroeste fosse derivada às exportações, é importante destacar o crescimento dos setores secundários e terciários durante a década 1960-1970. Esta diversificação da economia foi gerada pela queda na produção agrícola devida a geadas nas safras 69/70 e não por uma modificação planejada da estrutura produtiva da região, porém, o resultado foi o fortalecimento da economia da região (SUDESUL, 1974).

### II.1.3 Caracterização Física

Geograficamente, a área de estudo encontra-se na parte norte do que se conhece como o terceiro planalto basáltico paranaense, com um território aproximado de 50.000 km<sup>2</sup>(MAACK, 1981). A região é seccionada pelos afluentes do Rio Paraná, os Rios Ivaí e o Piquiri. A área Norte, desde o Rio Ivaí ao Rio Paranapanema, limite com o Estado de São Paulo, apresenta condições diferentes das outras duas regiões. Nela, como descreve MAACK (1981):

*“A paisagem foi modelada com uma topografia plana, e com formas de ondulações suaves, onde as descidas aos vales não são tão abruptas quanto no Oeste do estado, onde o nível de base é mais baixo”.*

As elevações variam de 226 m a 730 m acima do nível do mar. Outra condição que individualiza a área de estudo corresponde ao clima, já que a região é considerada de transição entre o clima subtropical, que caracteriza ao Sul do Rio Ivaí, e o clima tropical de altitude do Oeste paulista (MAACK, 1981).

O tipo de vegetação original desta região Norte, corresponde à Mata Pluvial Subtropical com ilhas de araucária (MAACK, 1981). Com a ocupação acelerada do território, a vegetação original foi substituída progressivamente por culturas agrícolas, destacando-se o plantio de café.

A região se caracteriza por duas formações litográficas básicas (MAACK, 1981):

- **Derramamentos Basálticos** de lava da formação Serra Geral. Acontecido até o Eocretáceo. Estes cruzam o planalto em direção Noroeste como diques de diabásicos.

- **Arenito Eólico Caiuá** que se estende sobre os derrames basálticos em forma contínua e profundidade até 150 m a Oeste, e a Leste como reminiscente de erosão geológica.

Os solos são classificados como Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho Escuro, e solos Aluvionais ocupando pequenas áreas de drenagem natural.

No entanto, o que mais favorece o Noroeste do Paraná é a existência do Latossolo Roxo, conhecido como “terra roxa”, tipo de solo derivado de rochas da formação Serra Geral. Este tipo de solo abrange uma vasta e contínua extensão, cuja presença é maior do que no território paulista. Foi esta terra, de grande fertilidade, que facilitou a expansão da cultura do café, vinda de São Paulo, e sustentou o crescimento populacional na região. O processo se favoreceu pela riqueza da vegetação, da que se obtivera madeira de excelente qualidade para a construção de habitações.

## **II.2 PROCESSO EROSIVO NOS ANOS SETENTA**

### **II.2.1 Descrição do Processo Erosivo**

Devido às características da região, e ao seu processo de colonização, a parte Norte do Noroeste do Estado de Paraná foi a que permaneceu por mais tempo desabitada, até o ano 1940. A colonização se processou rápida e regularmente, com as derrubadas de árvores, avançando para Oeste de maneira contínua e progressiva, favorecida por fatores físicos, como o tipo de solo e/ou clima, e também, pelas vantagens decorrentes da maior proximidade com o Estado de São Paulo. Assim, o Noroeste do Estado do Paraná atraiu uma forte corrente colonizadora, interessada pelas possibilidades dum aproveitamento agrícola rendoso, tendo por base o plantio de café. Como resultado surgiu um grande número de cidades e povoados, os quais trouxeram o progresso à região. Grande parte deste sucesso se deve a ação de empresas colonizadoras como a Companhia Melhoramentos Norte do Paraná.

Porém, este crescimento populacional e econômico derivado da produção agrícola, gerou a devastação duma grande área de floresta virgem. Segundo MAACK (1981), da primitiva área de 167.824 km<sup>2</sup> de mata virgem, foram destruídos 119.688 km<sup>2</sup> e transformados em terras de cultura ou de mato secundário, entre os anos 1930 e 1965. MAACK (1981) afirma que esta devastação alterou o regime de chuvas, tornando-as mais irregulares.

O efeito mais importante deste desmatamento corresponde à exposição direta do solo à ação da chuva. Com a mata, a chuva distribui-se regularmente no solo, a água infiltra-se lentamente e é parcialmente absorvida pelas raízes, e dirigida para o lençol freático, para assim, realimentar as fontes subterrâneas.

Sem a cobertura vegetal, o solo é afetado pela erosão, pluvial. E este processo erosivo constituiu-se no maior problema ambiental da década de 1970, na Região Noroeste do Estado do Paraná, principalmente nas áreas de solo do tipo “Arenito Caiuá”.

## **II.2.2 Formas de Erosão**

A erosão do solo numa bacia hidrográfica ocorre de três formas, que frequentemente apresentam-se em sequência: erosão laminar, em forma de sulcos ou ravinas, e voçorocas.

- **Erosão Laminar**

Forma incipiente e quase imperceptível da perda de solo que ocorre nas camadas superficiais, onde, por causa da perda da cobertura vegetal, que protegia o solo, a água que escoar pela superfície, carrega progressivamente o solo fértil, que perde sua produtividade agrícola.

- **Erosão em forma de sulcos ou ravinas**

A água, escoando na superfície do solo descoberto, adota caminhos preferenciais, e se concentra com formação de cursos d'água, o que gera pequenos rasgos e sulcos na superfície do terreno. Os sulcos mais profundos são chamados de ravinas.

- **Erosão em forma de voçorocas**

Os sulcos tendem a se desenvolver continuamente, lateralmente e em profundidade, até chegarem a estratos mais resistentes ou ao lençol freático. Ocorreram, principalmente, nas áreas de solo do tipo Arenito Caiuá no Noroeste do Estado do Paraná, devido à baixa compactação das areias finas deste tipo de solo (NERY, 2002). A fundação e o crescimento das cidades foram as mais importantes fontes de formação de voçorocas. Nas **Figuras II.2 a II.5**, apresentam-se exemplos brasileiros das formas de erosão (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1993).

A **Figura II.6** mostra o crescimento, em sentido oposto ao escoamento, numa voçoroca na periferia da cidade de Paranavaí, na década de sessenta.



**Figura II.2 – Erosão laminar (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1993)**



**Figura II.3 – Terreno de cultura com sulcos de erosão (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1993)**



**Figura II.4 – Terreno de encosta com sulcos (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1993)**



**Figura II.5 – Voçoroca em Latossolo Vermelho-Escuro. Valparaíso, SP (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1993)**



**Figura II.6 – Voçoroca na periferia da cidade de Paranavaí em 1963 (MAACK1981)**

### II.2.2.1 Distribuição Local dos tipos de erosão

Segundo a SUDESUL (1973) *apud* NERY (2002), a erosão no Noroeste do Estado do Paraná se manifestou tanto na região rural quanto na urbana. No entanto, a gravidade do processo erosivo na área urbana foi a que despertou mais preocupação dos poderes públicos, em combater os problemas gerados após cada chuva, quando as ruas eram destruídas pelas voçorocas, assim como outras estruturas existentes nas cidades.

A principal causa da erosão nas áreas urbanas foi devida à falta de planificação da ocupação da Região Noroeste do Paraná, como por exemplo: (i) construção em solos de gradiente superior aos limites suportáveis pela constituição geomorfológica; (ii) O traçado inadequado das ruas, seguindo os maiores gradientes topográficos, o que concentrava o poder erosivo da água; e (iii) falhas na infraestrutura básica das cidades, devido à rápida ocupação da região, como ilustrado na **Figura II.7**.

O efeito da erosão nas cidades era facilmente constatado, como já se mencionou, pela destruição de obras de engenharia. O mesmo acontecia nas rodovias, onde, por causa da deficiência nas obras de drenagem, trechos eram destruídos. Analogamente, a erosão na região rural foi constatada na mesma intensidade, com o surgimento de voçorocas que se estenderam por distâncias longitudinais superiores a 10 km através dos campos desmatados. As **Figuras II.7** e **II.8** mostram erosões no município de Icaraíma, nas regiões urbanas e rural, observadas na época dos estudos aqui analisados.



**Figura II.7 – Erosão na região urbana, município de Icaraíma, Noroeste do Paraná (Foto WILSON-JR., 1972)**



**Figura II.8 – Erosão na região rural, município de Icaraíma, Noroeste do Paraná (Foto WILSON-JR., 1972)**

Cabe destacar que em quase todos os tipos de ocupação da Região Noroeste do Estado do Paraná surgiu alguma tipo de erosão, que se manifestou com gravidade tanto nas áreas urbanas quanto rurais, e juntos às obras de Engenharia. O processo Erosivo foi tão intenso que vários municípios, como: Cianorte, Icaraíma, Rondon, Umuarama, Loanda, decretaram Estado de Calamidade Pública.

### **II.2.3 Combate à Erosão: Estudos Hidrossedimentométricos na Bacia Hidrográfica do Rio Ivaí**

A situação na região tornou-se muito grave e preocupante, as voçorocas se desenvolviam com intensidade nas regiões urbana e rural.

Várias tentativas locais foram feitas para minimizar o processo erosivo, como:

- A construção em série de bacias de decantação e contenção de sedimentos, e
- A canalização e desvio dos escoamentos mais violentos.

Os resultados dessas tentativas locais não corresponderam às expectativas e grande somas de dinheiro foram gastas.

Quando as cidades decretaram estado de calamidade pública, foi solicitado pelo Estado de Paraná, ajuda nacional e em seguida assistência técnica à Organização de Estados Americanos (OEA), para o controle da erosão no Noroeste do Estado do Paraná.

A OEA, juntamente com o Ministério do Interior e o Governo do Estado do Paraná, através da Secretaria de Viação e Obras Públicas (SVOP), formou um grupo multinacional de estudos sobre a erosão, pois problemas semelhantes já haviam sido

detectados nos países vizinhos, como na Bacia do Rio Bermejo na Argentina, Paraguai e Bolívia (WILSON-JR. *et al.*, 1980).

O objetivo deste grupo de trabalhos foi o estudo das causas e consequência do processo erosivo na Região Noroeste do Estado de Paraná: os aspectos hidrológicos, sedimentológicos e geológicos, assim como aspectos históricos e socioeconômicos sendo parte destes estudos (WILSON-JR. *et al.*, 1974, 1980).

Os trabalhos realizados na Bacia Hidrográfica do Rio Ivaí se inserem no contexto dos Estudos Hidrológicos e Sedimentológicos do Noroeste do Estado de Paraná (WILSON-JR. *et al.*, 1980).

- **Primeiro Objetivo:** Estimativa do movimento de sedimentos através de uma seção do trecho inferior do Rio Ivaí, com a finalidade de se ter uma medida total do sedimento transportado até o Rio Paraná, durante um ciclo hidrológico.
- **Segundo Objetivo:** Estimativa do movimento de sedimentos em quatro sub-bacias do Rio Ivaí, para se avaliar de que forma diferentes usos de solos, exploração e condições naturais podem influir no transporte de sedimentos durante um ciclo hidrológico.

No mês de novembro de 1973, a equipe de engenheiros e técnicos do Instituto de Pesquisa Radioativas-IPR, e hidrometristas da Administração de Recursos Hídricos-ARH, visitaram nove sub-bacias do Rio Ivaí, das quais foram selecionadas quatro para a caracterização dos tipos e usos de solo: Córrego Horácio; Córrego Jacutinga; Córrego Vinte e Um e Ribeirão do Rato, como apresentado na **Tabela II.3**, a seguir.

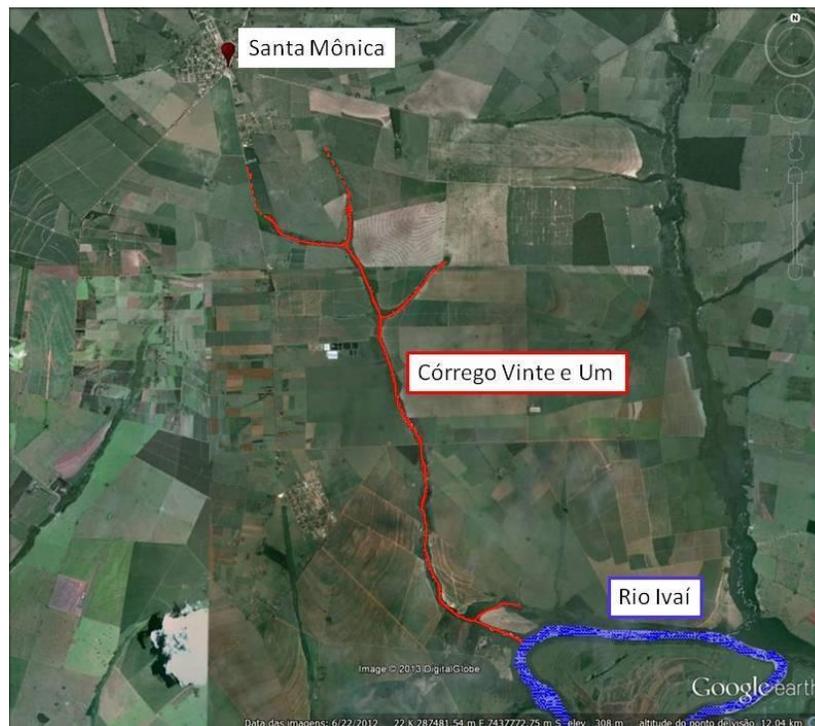
**Tabela II.3 – Sub-bacias do Rio Ivaí, caracterizando diferentes tipos e usos de solos(WILSON-JR.*et al.*, 1980)**

GRUPOS	SUB-BACIAS	SUPERFÍCIE km <sup>2</sup>	TIPO DE SOLO	USO DE SOLO
A	Córrego Vinte e Um	34,0	ARENITO	PECUÁRIA
	Córrego do Avião	37,0		
B	Córrego Horácio	42,0	ARENITO	AGRICULTURA
	Córrego Maravilha	39,0		
C	Ribeirão do Rato	66,0	INTERMEDIÁRIO*	AGRICULTURA
	Ribeirão da Divisa	27,0		
D	Córrego Jacutinga	44,0	BASALTO	AGRICULTURA
	Córrego Bananeiras	42,0		
	Córrego Taquaraçu			

\*Solo Intermediário é constituído de 50% de basalto e 50% de arenito.

### II.2.3.1 Sub-Bacia do Córrego Vinte e Um

O Córrego Vinte e Um nasce ao Sul da localidade de Santa Mônica numa altitude superior a 320 metros em relação ao nível médio do mar. O seu curso principal de 10.05 km de comprimento estende-se no sentido Norte-Sul até sua foz na margem direita do Rio Ivaí, numa altitude de 240 m. A declividade média do curso principal é de 1838 cm/km. O Córrego Vinte e Um drena uma área de aproximadamente 34 km<sup>2</sup>. A **Figura II.9**, apresenta a localização do Córrego Vinte e Um, em relação ao Rio Ivaí e a localidade de Santa Mônica.



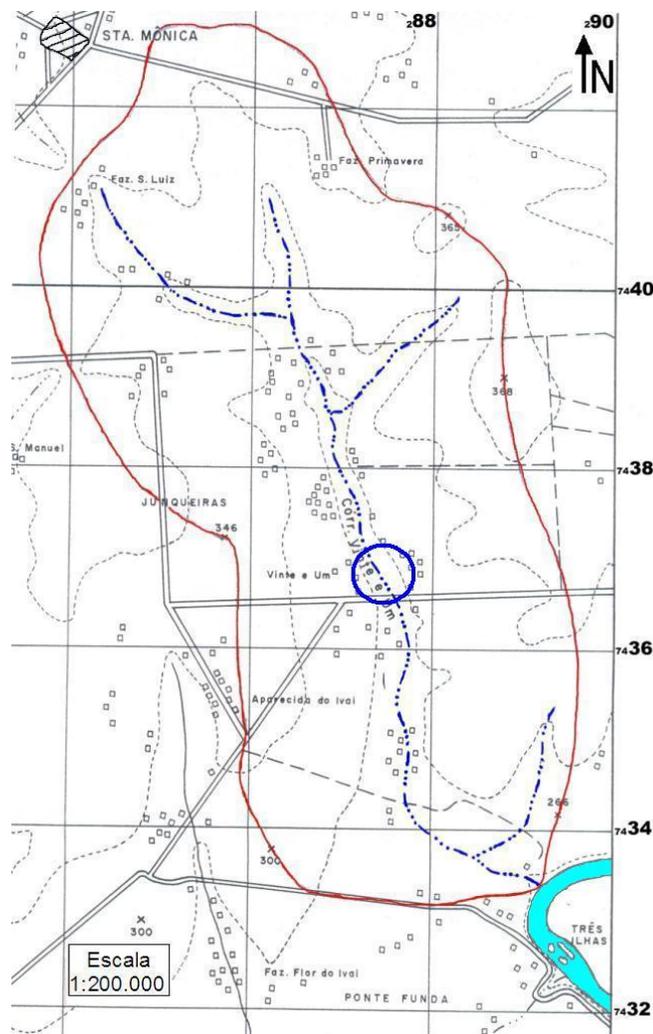
**Figura II.9 – Curso do Córrego Vinte e Um (GOOGLE EARTH,2013)**

O Córrego Vinte e Um nasce da junção de dois córregos menores e ao longo do seu curso recebe o aporte, pela margem esquerda, de mais dois outros, onde os comprimentos, na década de setenta eram de 1,9 e 2,05 km.

O trecho representativo encontrava-se na então Fazenda Vitória, de propriedade de Ângelo Tonhon.

A sub-bacia encontra-se numa região de arenito Caiuá, e uso do solo predominantemente pecuário. A topografia da sub-bacia é suavemente ondulada com colinas de altitude máxima igual a 360 m. Apresenta-se, na **Figura II.10**, um mapa da sub-bacia hidrográfica do Córrego Vinte e Um, com destaque para a localização

aproximada do trecho representativo de medidas. A estação fluviométrica instalada para os trabalhos no trecho representativo do Córrego Vinte e Um manteve-se em funcionamento até maio de 1981 sob a administração da Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental-SUDERHSA (DÉLIO *et al.*, 1996). A Estação pluviométrica, de nome Aparecida do Ivaí, encontra-se na localidade vizinha de Santa Isabel do Ivaí (DÉLIO *et al.*, 1996).



**Figura II.10 – Sub-bacia do Córrego Vinte e Um. Carta IBGE – Folha de Tapira**

Os estudos hidrossedimentológicos realizados no Córrego Vinte e Um foram desenvolvidos simultaneamente aos trabalhos no Rio Ivaí, e sub-bacias dos córregos Horacio e Jacutinga e Ribeirão do Rato, de acordo a metodologia que será apresentada no próximocapítulo.

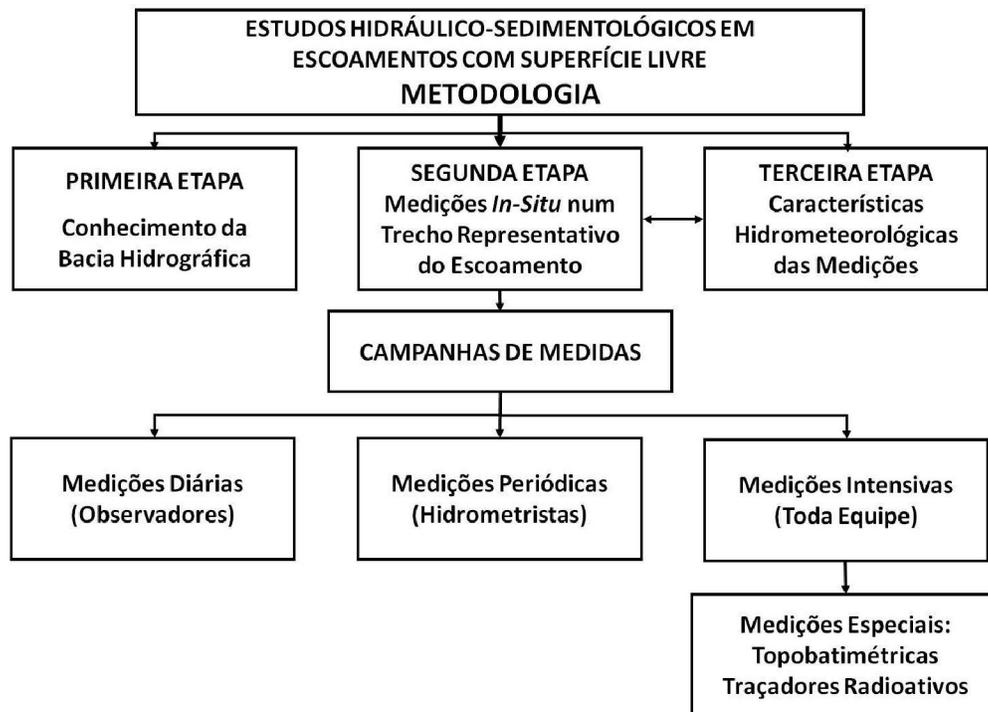
## CAPÍTULO III

### METODOLOGIA

No presente capítulo apresenta-se a metodologia desenvolvida por WILSON-JR., 1999, que permite a descrição do movimento sedimentar e a estimativa da descarga sólida durante um ou mais ciclos hidrológicos, em escoamentos com superfície livre. Esta metodologia foi utilizada, nos estudos realizados simultaneamente, no trecho inferior de Rio Ivaí e nas quatro sub-bacias: Córrego Vinte e Um; Horácio, Jacutinga e Ribeirão do Rato durante o período de Agosto-1974 a julho-1976. É adotada nesta dissertação para o tratamento dos dados e da estimativa da descarga sólida anual.

A metodologia compreende as seguintes etapas básicas apresentadas na **Figura III.1**, a seguir (WILSON-JR., 1999):

- Conhecimento da bacia hidrográfica,
- Medições *In-situ* num trecho representativo do escoamento,
- Determinação das características hidrometeorológicas das medições.



**Figura III.1** – Metodologia adotada nos estudos hidrossedimentométricos do Córrego Vinte e Um (WILSON-JR. *et al.*, 1980; WILSON-JR., 1999)

### **III.1 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DA METODOLOGIA ADOTADA NO CÓRREGO VINTE E UM**

#### **III.1.1 Conhecimento da Bacia Hidrográfica**

De acordo com WILSON-JR., 1999:

*“O conhecimento da bacia hidrográfica, bem como das sub-bacias representativas de cenários específicos delimitados pelos empreendimentos, envolve o conhecimento das características geográficas, geológicas, hidrometeorológicas, sedimentológicas, socioeconômicas e históricas, entre outras, que abrangem trabalhos em escritório, no campo e na interação com especialistas desses temas específicos.*

*Nesta etapa, os levantamentos aerofotogramétricos, as imagens de satélite e a utilização das técnicas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). São extremamente úteis e poderosas. Seus papéis consistem em identificar rapidamente as características fixas (topografia, pedologia) e processar as características mutáveis (cobertura vegetal e tipo de solo) da bacia contribuinte, às quais condicionam os aportes de água e sedimentos(CENTENO e RISSO, 1991)”.*

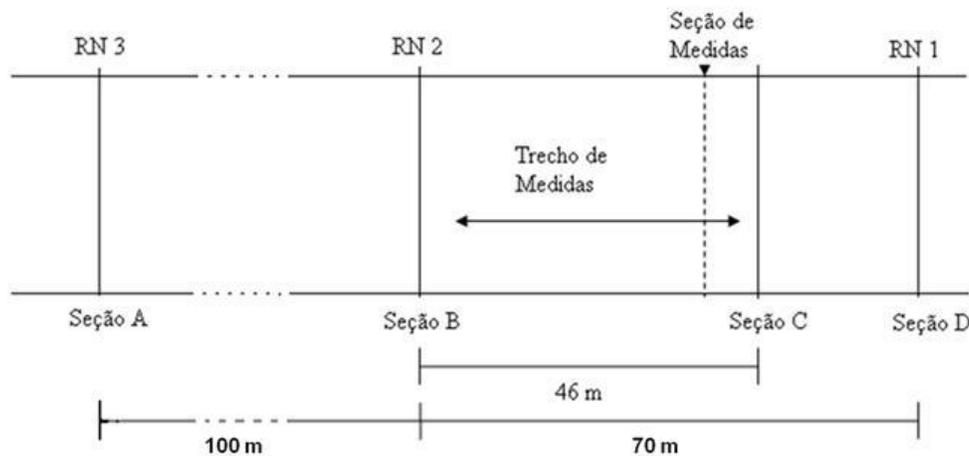
#### **III.1.2 Escolha do Trecho Representativo do Escoamento**

Segundo WILSON-JR., 1999:

*“É recomendável que as medições hidráulicas e sedimentológicas de um curso d’água sejam realizadas num trecho onde o escoamento seja praticamente uniforme e suas características hidrodinâmicas e morfológicas representativas de uma grande extensão de escoamento, e, que neste trecho ou proximidade existam observações hidrossedimentológicas de vários anos.*

*Para o conhecimento dos aspectos morfológicos e sedimentológicos das bacias hidrográficas, pra a escolha dos trechos representativos, programação das campanhas de medidas analise das representatividades dos postos de medições, são necessárias visitas de campo, durante situações metereológicas distintas.”*

Além do trecho ser praticamente retilíneo, suas margens devem ser estáveis. Deve ser de fácil acesso, onde o escoamento não seja alterado pela vegetação, por blocos rochosos ou outros obstáculos que modifiquem as características hidrodinâmicas ou dificultem as medições. Dentro do trecho representativo é determinada a seção transversal de medidas, que deve ser localizada aproximadamente a 7/10 do comprimento do trecho retilíneo, ou seja, 3/10 da extremidade a jusante. É nessa distância que se pode considerar o campo de velocidades simétrico e sem influências das extremidades montante e jusante do trecho. Na **Figura III.2**, a seguir, pode se observar um esquema do trecho representativo.



**Figura III.2 – Trecho Representativo e Seção de Medidas do Córrego Vinte e Um (WILSON-JR., RODRIGUES e SANTOS, 1974)**

O trecho representativo do Córrego Vinte e Um localizou-se na Fazenda Vitória, no município de Santa Isabel do Ivaí.

### III.1.3 Medidas Realizadas no Trecho Representativo

Após da escolha do trecho representativo e da seção de medidas, iniciam-se as campanhas de medições da segunda etapa da Metodologia. Elas são:

- Campanha de Observações Diárias;
- Campanha de Observações Periódicas;
- Campanha de Medições Intensivas, das quais se destacam as Medições Especiais do movimento de sedimentos por arraste do trecho representativo.

## **III.2 CAMPANHAS DE MEDIDAS REALIZADAS NO CÓRREGO VINTE E UM**

### **III.2.1 Campanha de Observações Diárias**

Correspondem às medidas realizadas diariamente, durante um ciclo hidrológico ou mais por observadores residentes perto da área de estudo. As medidas correspondem à intensidade de chuva, leituras de nível de água e as medidas de concentração dos sedimentos em suspensão.

Foram instaladas em 15 de abril de 1974, no trecho representativo da Fazenda Vitória, três réguas limimétricas: Régua N°3, na extremidade a montante do representativo, Régua N°2 a montante e Régua N°1 a jusante do trecho de medidas respectivamente como ilustrado na Figura III.2, precedente. As medidas de nível d'água foram realizadas a partir das datas de 25 de junho de 1974 nas réguas N° 2 e N° 3, e no primeiro de julho de 1974 na Régua N° 1. As leituras foram feitas diariamente as 07:00 e 17:00 hrs.

As coletas de amostras de sedimentos em suspensão foram realizadas seção de medidas do Córrego Vinte e Um. Para determinação da concentração e granulometria médias do material sólido na coluna de água.

### **III.2.2 Campanha de Medições Periódicas**

As campanhas periódicas são realizadas por equipe de hidrometristas e têm como finalidade a obtenção de informações morfológicas, hidráulicas e sedimentológicas do trecho em estudo. As medições realizadas no trecho representativo do Córrego Vinte e Um correspondem a:

- Medições de velocidade e cálculo da vazão líquida na seção de medidas.
- Coleta detalhada de água para determinação da concentração e granulometria dos sedimentos em suspensão.
- Coleta de amostras de material do fundo e arraste, para determinação da granulometria dos sedimentos e, eventualmente, da descarga sólida por arraste.
- Levantamento topobatimétrico do trecho representativo, incluindo inclinações da linha da água e do talvegue, marcas de cheias e inundações, configurações de fundo, características morfológicas do curso de água e da bacia (WILSON-JR., 1999; NERY, 2002).

### **III.2.3 Campanha Intensiva de Medições**

Durante esta campanha são realizadas todas as medições citadas anteriormente, acompanhadas das medidas especiais, apresentadas a seguir.

A campanha de intensiva é realizada na fase de maior transporte de sedimentos, no período das cheias, ou nos períodos de águas cheias, preferencialmente na subida do nível da água, quando a bacia é lavada pelas águas das chuvas (NERY, 2002; WILSON-JR., 1999).

Durante a campanha são realizadas as medições especiais, que no caso do Córrego Vinte e Um corresponderam ao registro das configurações de fundo e a aplicação de traçadores radioativos. A finalidade das medições especiais é a de melhorar ou testar o ajuste das relações analíticas obtidas entre as características hidráulicas e sedimentológicas do escoamento (WILSON-JR.*et al.*, 1978).

As medições com traçadores radioativos permitem o levantamento das características cinemáticas e dinâmicas do escoamento e dos sedimentos, fornecendo resultados seguros sobre: quantidades transportadas, trajetórias e velocidades de transporte, tempos de transito de sedimento e poluentes em escoamentos diversos e dispersão desses sedimentos e poluentes (WILSON-JR., 1999).

O registro das configurações do fundo permite avaliar as condições de equilíbrio sedimentológico vigentes no trecho representativo, durante o ciclo hidrológico, e sob condições adequadas, calcular a descarga sólida por arraste.

### **III.2.4 Determinação das Características Hidráulicas e Sedimentológicas do Trecho Representativo da Bacia**

Os resultados das campanhas de medidas periódicas permitem que hipóteses e considerações sejam feitas sobre o movimento de sedimentos e que sejam estabelecidas as relações analíticas entre as variáveis hidrodinâmicas e sedimentológicas. Os resultados das campanhas diárias permitem que estas relações sejam aplicadas para todo o ciclo hidrológico estudado e finalmente, as medições especiais permitem verificar e calibrar as expressões e modelos obtidos.

As relações obtidas são integradas no tempo para o cálculo, por exemplo, dos transportes sazonais ou anual de sedimentos, e podem ser também, extrapoladas para outras partes da bacia ou outras bacias de características similares. Nas **Figuras III.3 e III.4**, a seguir, apresentam-se as relações das medidas realizadas na Estação Fazenda Vitória, no Córrego Vinte e Um, nos períodos de junho de 1974 a agosto de 1975.

	1974						
Tipo de dados	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
<b>Campanha de Obs. Diárias</b>							
Nível d'água: Régua N° 1							
Nível d'água: Régua N° 2							
Nível d'água: Régua N° 3							
Sedimentos em suspensão							
Registros Pluviométricos							
<b>Campanha de Obs. Periódicas</b>							
Vazão Líquida							
Sedimentos de Fundo							
<b>Campanha intensiva de Medidas</b>							
Sedimentos por Arraste							
Registro Configurações do Fundo							
Traçadores Radioativos							

**Figura III.3 – Relação das medições realizadas na sub-bacia do Córrego Vinte e Um, no trecho representativo e proximidade da Fazenda Vitória: ano 1974**

	1975							
Tipo de dados	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto
Campanha de Obs. Diárias								
Nível d'água: Régua N° 1								
Nível d'água: Régua N° 2								
Nível d'água: Régua N° 3								
Sedimentos em suspensão								
Registros Pluviométricos								
Campanha de Obs. Periódicas								
Vazão Líquida								
Sedimentos de Fundo								
Campanha intensiva de Medidas								
Sedimentos por Arraste								
Registro Configurações do Fundo								
Traçadores Radioativos								

**Figura III.4 – Relação das medições realizadas na sub-bacia do Córrego Vinte e Um, no trecho representativo e proximidade da Fazenda Vitória: ano 1975**

## CAPÍTULO IV

### TRATAMENTO DOS DADOS DE CAMPO DAS CAMPANHAS HIDRÁULICO-SEDIMENTOLÓGICAS

Apresentam-se neste capítulo, o tratamento dos dados das campanhas de campo e das análises de laboratório relativas às informações hidrossedimentológicas obtidas das medições relacionadas nas **Figuras III.3 e III.4**.

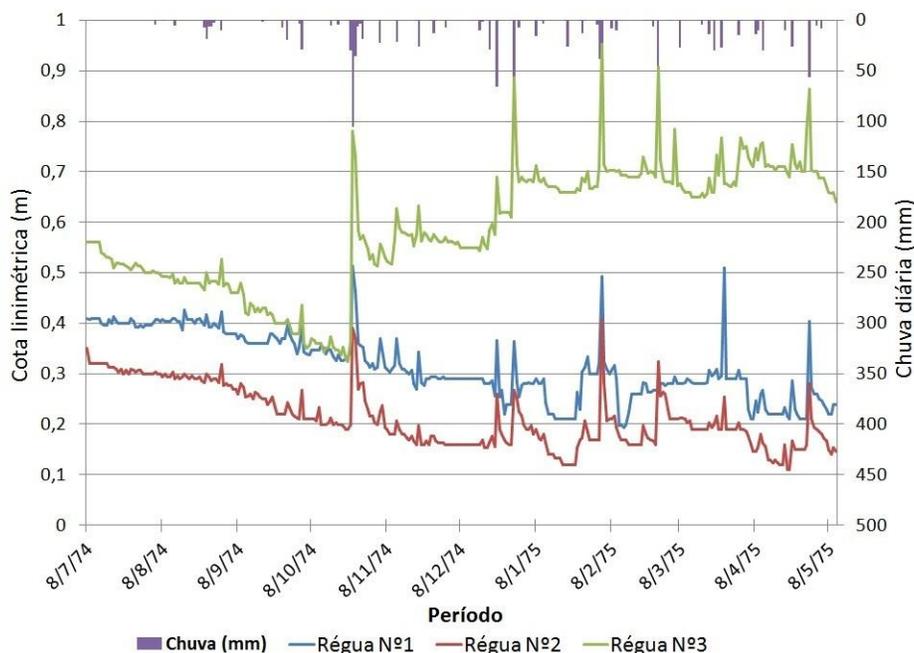
A análise de consistência dos dados iniciou-se com a representação gráfica dos dados obtidos das campanhas diárias de medições; ou seja, dos dados pluviométricos, dos níveis médios diários da água (cotagramas) das seções estudadas, para se identificar erros de leitura e/ou anotações e digitação.

#### IV.1 DADOS PLUVIOMÉTRICOS E DE NÍVEL D'ÁGUA

Durante as primeiras visitas de campo à Região Noroeste do Estado do Paraná, a sub-bacia do Córrego Vinte e Um foi escolhida como característica dum solo do tipo arenito e uso para pecuária. No trecho representativo, situado na Fazenda Vitória, foram instaladas três réguas linimétricas e nas proximidades do então povoado de Santa Isabel do Ivaí, no quintal da casa do morador e observador Sr “Gaúcho”, um pluviômetro do tipo Ville de Paris. As coordenadas geográficas da localização do pluviômetro são: 23°07' S e 53°14' W.

Assim, no dia 25/06/74 iniciaram-se as leituras dos níveis d'água nas réguas e em 01/07/74 as medições pluviométricas. Importante ressaltar que o monitoramento foi contínuo durante o ciclo hidrológico estudado (**Figuras III.3e III.4**).

Os valores brutos foram digitalizados em planilhas de cálculo, das cadernetas de anotações de campo, originais do projeto desenvolvido naquela época. Uma primeira análise correspondeu à revisão visual dos valores de cotas para determinar a existência de valores que não se ajustassem aos dados pluviométricos. Para verificar visualmente possíveis incompatibilidades de leitura das réguas em função dos dados de chuva e/ou erros de digitação, os valores brutos obtidos nas anotações das cadernetas de campo foram digitalizadas em planilhas de cálculo e, em seguida, foram elaborados cotagramas relativos aos níveis médios diários das três réguas monitoradas, nas quais também foram plotados os valores das alturas diárias de chuva, apresentadas na **Figura IV.1**.



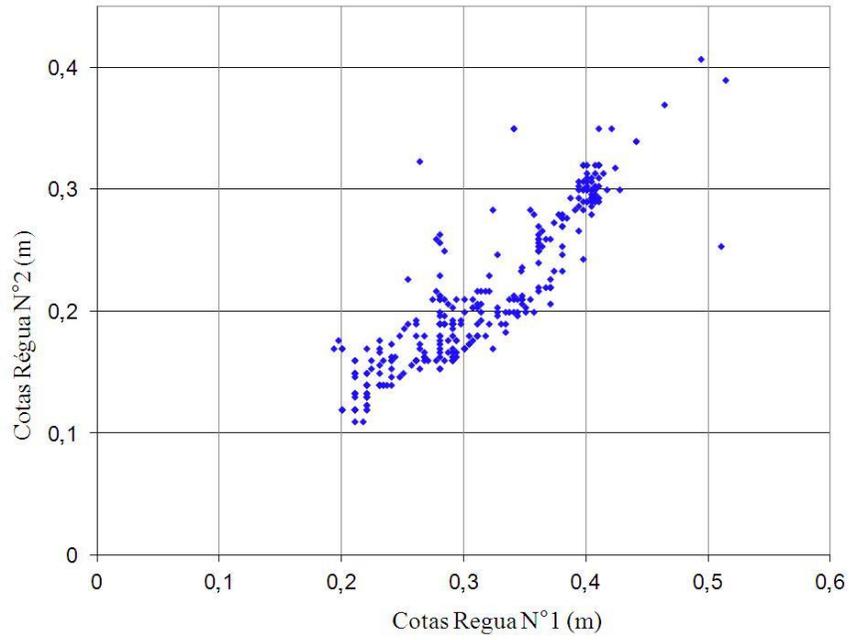
**Figura IV.1 – Cotogramas e alturas diárias de chuva nas seções das régua**

Identifica-se inicialmente, uma provável inconsistência nos valores das cotas linimétricas da Régua N°3, a partir de Outubro/74. Na tentativa de identificar a origem dessas inconsistências foram realizadas comparações entre os valores de cada uma das régua, conforme apresentado nas **Figuras IV.2, IV.3 e IV.4**, a seguir. Essas figuras mostram novamente, uma provável inconsistência nos valores das cotas linimétricas da Régua N°3.

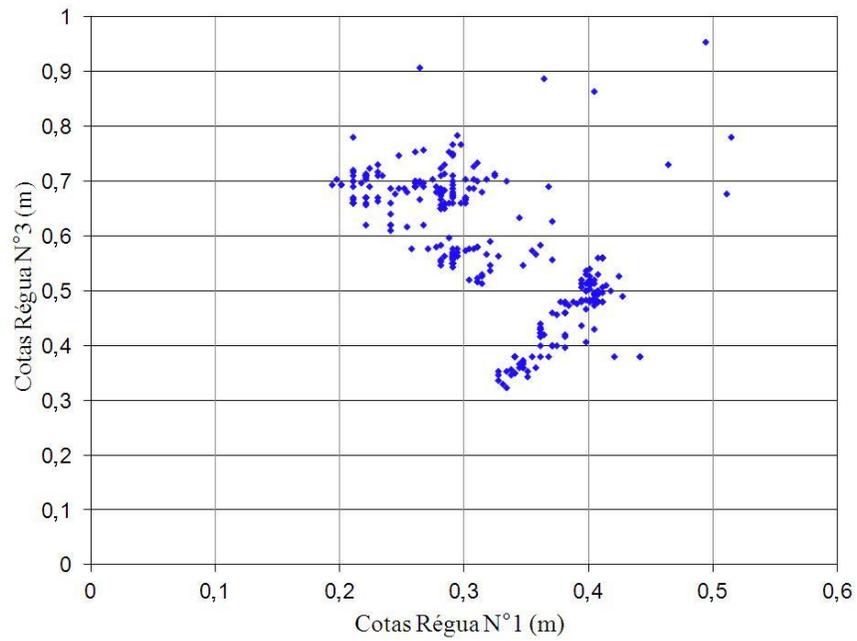
As duas análises apresentadas confirmaram inconsistência nos valores das cotas linimétricas lidas na Régua N°3, as quais poderão invalidar os resultados do estudo. Assim, para retificar e validar os dados foi necessário realizar retificações desses erros conforme descrito a seguir. Num primeiro passo se estabeleceu o valor da cota topográfica de cada régua, determinado no levantamento topográfico realizado no trecho representativo do Córrego Vinte e Um.

- **Levantamento topográfico**

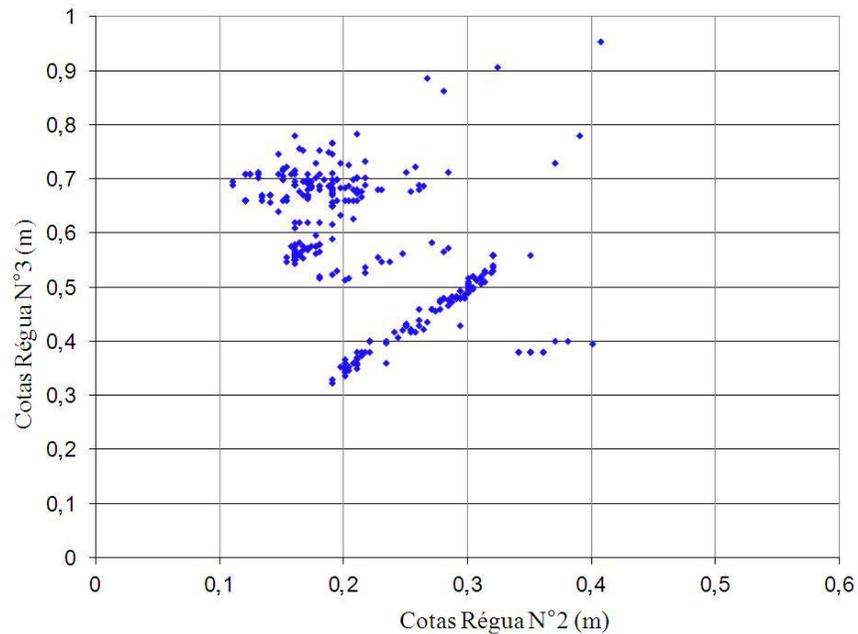
O levantamento topográfico foi no dia 2 de setembro de 1974. Criou-se uma grade de dez por dez metros ao longo do trecho representativo. Foram determinadas as cotas para cada ponto da grade, assim como os valores das cotas topográficas nas régua linimétricas. Na **Figura IV.5**, a seguir, apresenta-se a carta dos valores de curvas de nível, em metros, obtida do levantamento topográfico.



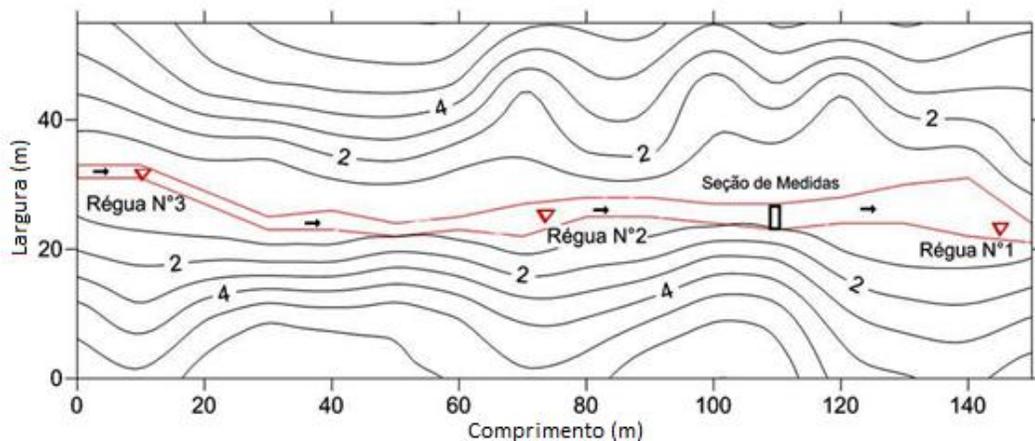
**Figura IV.2 – Comparação entre as cotas linimétricas das Régua N°1 e N°2**



**Figura IV.3 – Comparação entre as cota linimétricas das Régua N°1 e N°3**



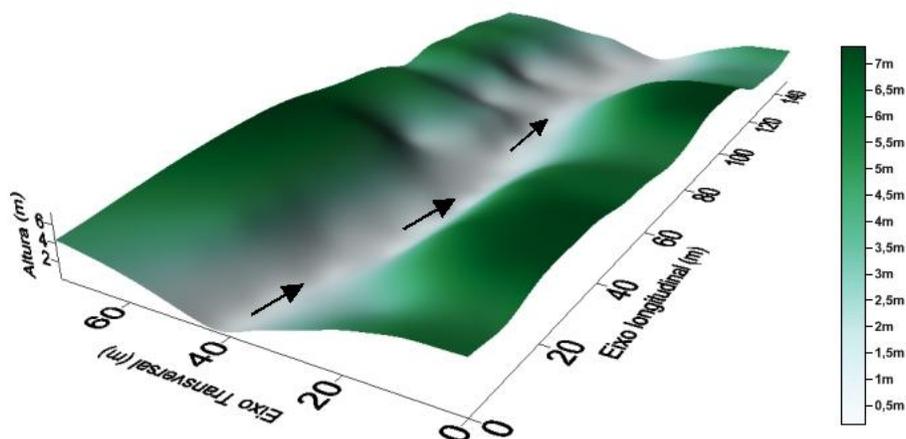
**Figura IV.4 – Comparação entre as cotas linimétricas das Régua N°2 e N°3**



**Figura IV.5 – Esquema da topografia do trecho representativo do Córrego Vinte e Um**

Outra finalidade do levantamento é que permite o cálculo das declividades da linha d'água e do talvegue, características importantes como dados de entrada dos modelos de transporte de sedimentos.

Na **Figura IV.6**, a seguir, apresenta-se uma representação tridimensional da topografia do trecho representativo, gerado a partir dos valores das cotas obtidos no levantamento.



**Figura IV.6 – Representação da Topografia do Trecho Representativo do Córrego Vinte e Um**

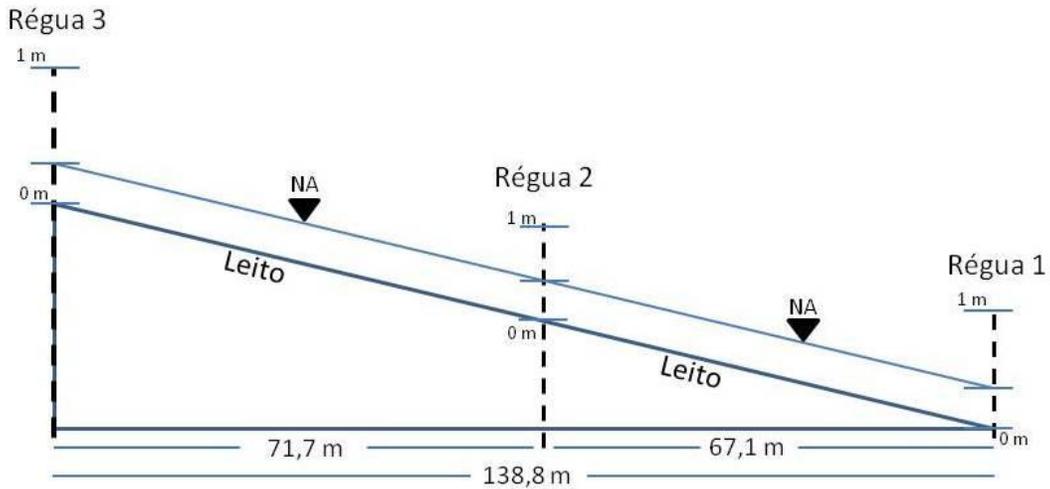
Os valores das leituras topográficas de cada régua do trecho representativo, foram transformados em valores de níveis de água, com a finalidade de determinar a declividade da linha d'água no trecho representativo, parâmetro fundamental nas equações de descarga solida por arraste. Na **Tabela IV.1**, a seguir, apresenta-se os valores de cotas das três réguas linimétricas, obtidos no levantamento topográfico do Córrego Vinte e Um.

**Tabela IV.1 – Valores das leituras topográfica das régua linimétricas**

	Régua N°1 (mm)	Régua N°2 (mm)	Régua N°3 (mm)
1 m da régua	1350	1567	0865
Nível da água	2136	2078	1640
0 m da régua	2350	2567	1865

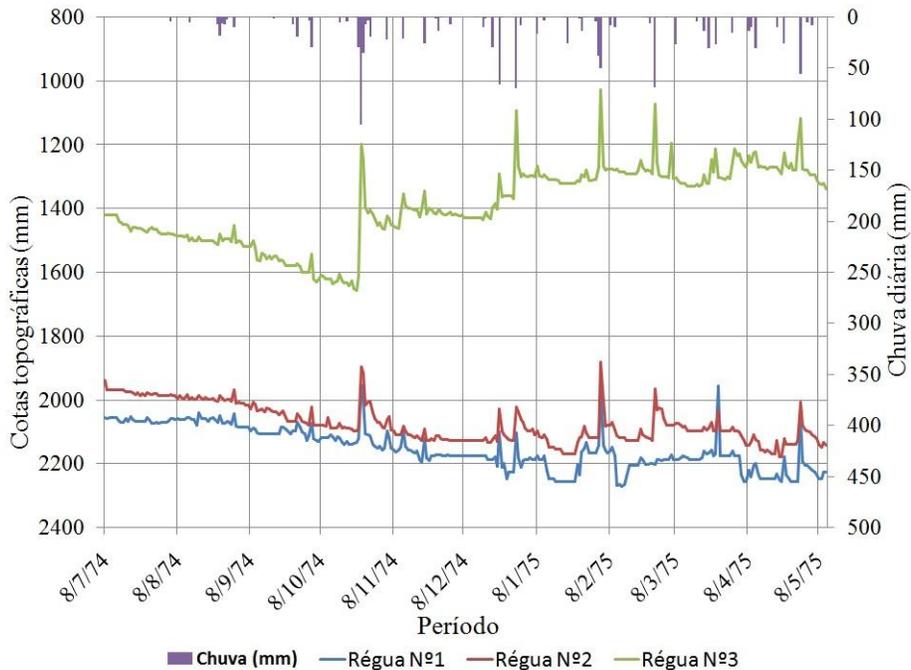
Desta tabela pode-se determinar o valor do nível d'água na régua, no momento da medição topográfica. Pode se constatar que os valores se encontram invertidos, ou seja, na determinação topográfica, os maiores valores indicam maior profundidade em relação ao nível de referência estabelecido no levantamento topográfico. Assim, o valor zero na Régua N°3 é menor se comparado com as outras réguas, significando que se encontra numa profundidade menor em relação ao nível de referência, como acontece neste caso, já que corresponde à régua localizada a montante no trecho representativo.

Na **Figura IV.7** apresenta-se o esquema do levantamento topográfico das régua linimétricas.



**Figura IV.7 – Esquema do levantamento topográfico das régua linimétricas**

Desta forma, os valores de nível d'água foram transformados em valores de cotas topográficas para poder-se determinar a declividade da linha d'água, conforme apresentado a seguir na **Figura IV.8**, onde se apresentam os mesmos gráficos da **Figura IV.1**. Porém, agora são utilizados os valores das cotas topográfica do nível d'água.



**Figura IV.8 – Níveis topográficos médios diários e alturas diárias de chuva**

Observa-se neste gráfico que as series de valores de cada régua assumem posições coerentes, ou seja, os valores da Régua N°3 s encontram numa altitude maior em relação às outras régua, tal como acontece no trecho representativo, pois se trata da régua localizada na parte superior do trecho.

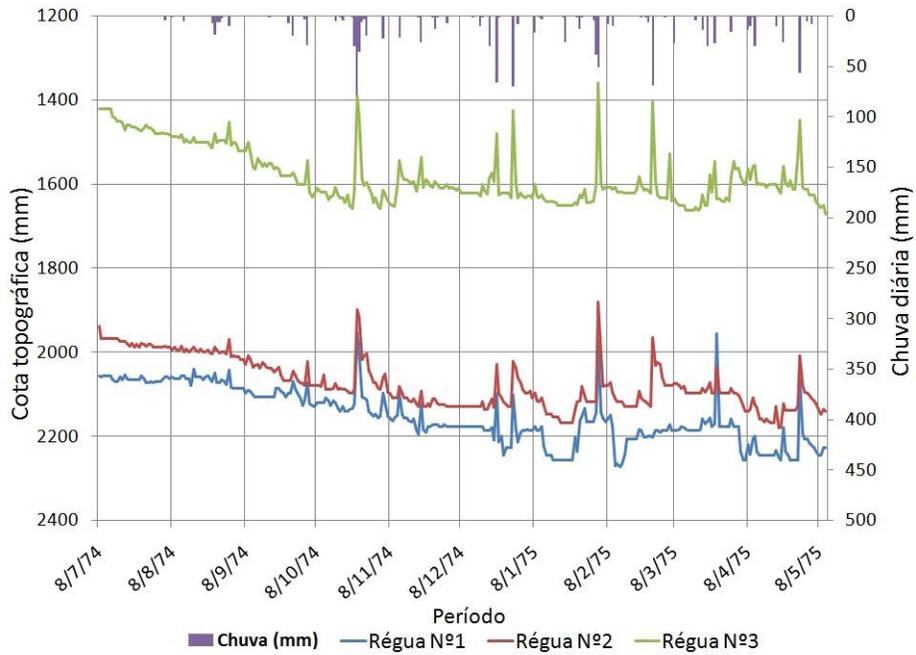
Embora os dados se encontrem de acordo com o esperado, os valores da Régua N°3 apresentam variações que fogem da tendência apresentada pelas outras duas régua. Pode-se notar que no evento máximo de chuva, acontecido no dia 25 de outubro, os valores da Régua N°3 apresentam o pico esperado pela chuva, porém não retornam aos mesmos valores que apresentavam antes da chuva; o mesmo acontece em outras duas ocasiões com as chuvas de 23 de dezembro e 30 de dezembro.

Esta constatação indica que, provavelmente, a Régua N°3 sofreu algum tipo de desnivelamento no momento das chuvas, de modo que os valores absolutos sofreram alteração que não afetaram acréscimos e decréscimos dos valores das cotas. A partir desta hipótese foi possível corrigir os valores da Régua N°3 mediante o procedimento apresentado a seguir.

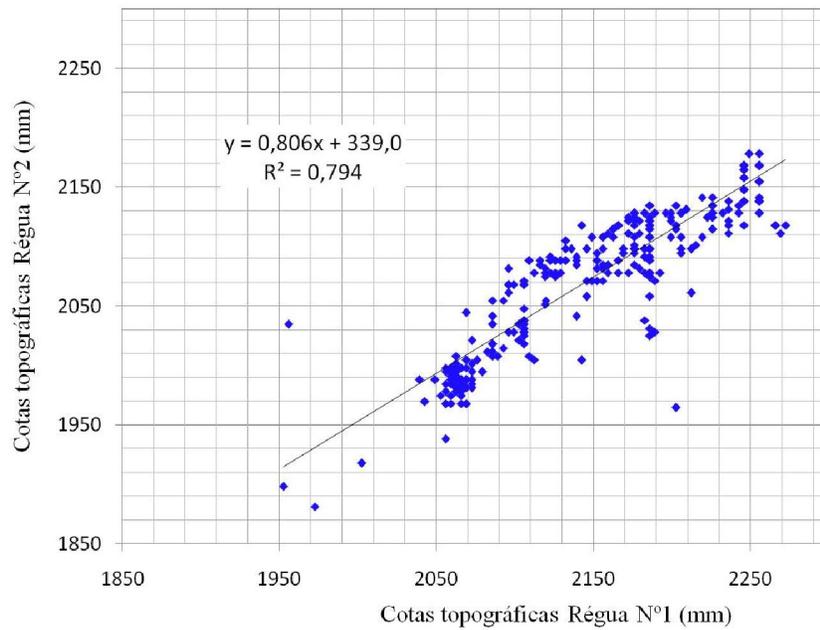
- Primeiro, determinou-se o valor médio das diferenças entre os valores da Régua N°3 e a Régua N°2 para o período até a chuva do dia 25 de outubro, que representa o dia em que os problemas na Régua N°3 se iniciaram. Foi usada a Régua N°2 para a calibração devido por ser a régua localizada no trecho de medidas e representar a régua mais protegida e monitorada.
- Determinado o valor médio da diferença entre as régua, pode se corrigir o restante da série de cotas da Régua N°3, para manter o valor médio da diferença sem interferir na variabilidade própria da régua. Na **Figura IV.9** a seguir, apresentam-se as séries de valores de altura da linha d'água para as três régua, com o valor da Régua N°3 corrigida e a série de dados de pluviometria para o mesmo período.

A correlação entre as três régua melhorou substancialmente a partir desta correção.

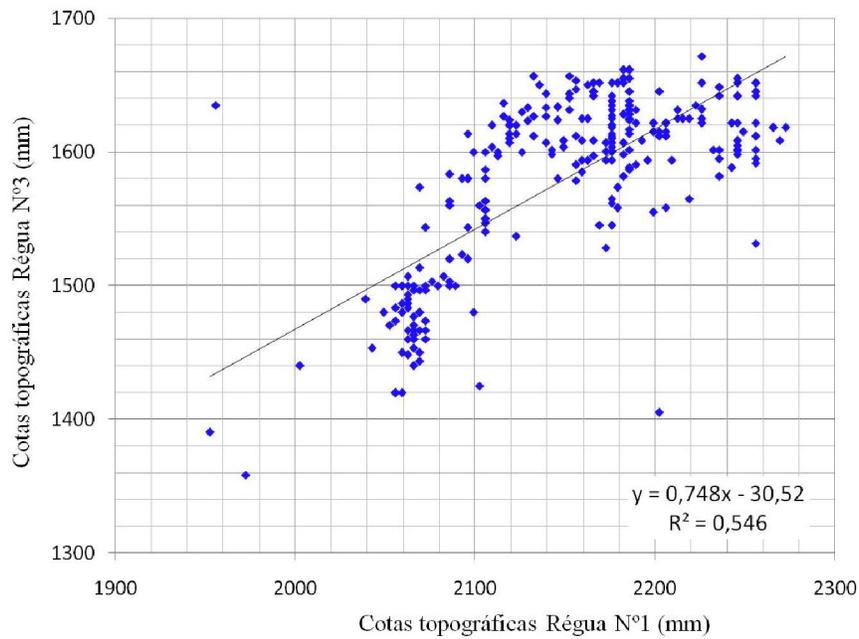
Nas **Figuras IV.10, IV.11 e IV.12**, apresentam-se as correlações entre os valores dos níveis topográficos médios diários da três régua.



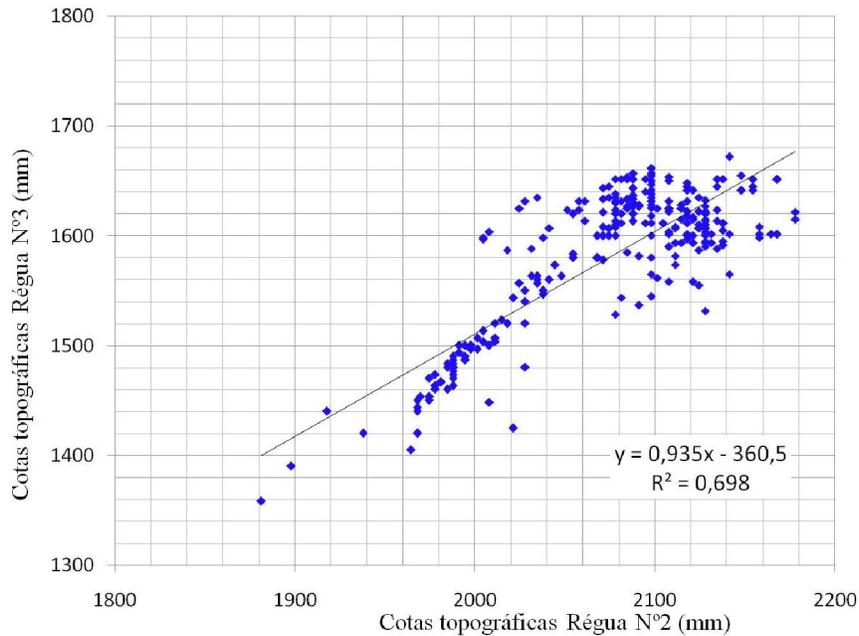
**Figura IV.9 – Níveis topográficos médios diários com Régua N°3 corrigida e alturas diárias de chuva**



**Figura IV.10 – Correlação entre os valores de cotas topográficas das Régua N°1 e N°2**



**Figura IV.11 – Correlação entre os valores de cotas topográficas das Régua N°1 e N°3**



**Figura IV.12 – Correlação entre os valores de cotas topográficas das Régua N°2 e N°3**

Finalmente com estes valores de nível d'água corrigidos foi possível determinar de forma mais precisa a declividade entre as três régua. Assim, na **Tabela IV.2**, apresentam-se as declividades médias entre as três régua. Para fins de

comparação apresentam-se as declividades médias determinadas com os valores originais das réguas e as declividades médias com a Régua N°3 corrigida.

**Tabela IV.2 – Declividades médias entre as três réguas**

Declividade (m/m)		
R3-R2	R3-R1	R2-R1
-0,00948	-0,00545	-0,00114
Declividades Retificadas (m/m)		
R3-R2	R3-R1	R2-R1
-0,00691	-0,00412	-0,00114

## IV.2 DADOS DE VELOCIDADE E CÁLCULO DE VAZÃO LÍQUIDA

A compilação dos dados brutos de velocidade da corrente líquida foi feita desde as cadernetas de campo da ARH/SVOP (Administração de Recursos Hídricos da Secretaria de Viação e Obras Públicas) do Estado do Paraná, utilizados durante o período do projeto. Os dados foram compilados em planilhas digitais que facilitaram o cálculo da vazão líquida. As planilhas têm o formato que se apresenta na **Figura IV.13**.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Fazenda Vitória				Hora ini	16:11	Régua ini	0,380			Eq Vel	n< 0,8	0,2509*n+0,007
2	Córrego Viente e Um		Molinete	15649	Hora fin	16:32	Régua fin	0,380				n> 0,8	0,2612*n
3	24/06/74												
4	PI	Dist.PI	Prof	Perimetro	Tempo	Rotacoes	n(rot/seg)	Vel. no poi	Área Seça	Vel. Média	Vazao	seg	
5	0	0,000	0,000	0,233					0,012	0,000	0,000		
6	I	0,200	0,120	0,412					0,068	0,463	0,031		
7	II	0,600	0,220	0,402	56,400	200,000	3,546	0,926241	0,096	0,887	0,085		
8	III	1,000	0,260	0,404	61,600	200,000	3,247	0,848052	0,116	0,809	0,094		
9	IV	1,400	0,320	0,400	67,800	200,000	2,950	0,770501	0,124	0,764	0,095		
10	V	1,800	0,300	0,412	69,000	200,000	2,899	0,757101	0,100	0,837	0,084		
11	VI	2,200	0,200	0,400	57,000	200,000	3,509	0,916491	0,080	0,894	0,071		
12	VII	2,600	0,200	0,400	60,000	200,000	3,333	0,870667	0,076	0,914	0,069		
13	VIII	3,000	0,180	0,400	54,600	200,000	3,663	0,956777	0,076	0,971	0,074		
14	IX	3,400	0,200	0,412	53,000	200,000	3,774	0,985666	0,100	0,798	0,080		
15	X	3,800	0,300	0,412	85,600	200,000	2,336	0,61028	0,140	0,305	0,043		
16	XI	4,200	0,400	0,500					0,100	0,000	0,000		
17	XII	4,600	0,100	0,224					0,010	0,000	0,000		
18	XIII	4,800	0,000						0,000	0,000	0,000		
19													
20													
21													
22													
23													
24									Vazão	0,726			
25									Vel. Média	0,661			
26									Área	1,098			
27									Largura	4,800			
28									Prof Média	0,229			
29									Perimetro	5,014			
30									Raio Hidr	0,218984			

**Figura IV.13 – Exemplo de planilha EXCEL para cálculo da vazão líquida**

O método utilizado para o cálculo da vazão líquida corresponde ao método da seção média. No total foram realizadas 137 medições de velocidades da corrente líquida durante o ciclo hidrológico de 24/06/74 e 24/08/75. Foram calculados os valores das variáveis características das seções transversais como a área, largura, profundidade, perímetro e, também a vazão líquida. Essas informações são essenciais para o estudo do movimento de sedimentos.

Na **Tabela IV.3**, apresenta-se parte da planilha original contendo os valores de vazão líquida calculados para o trecho representativo do Córrego Vinte e Um.

**Tabela IV.3 – Valores de Vazão líquida para o Córrego Vinte e Um**

No	Data	Hora	Cota(m)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Velocidade Média (m/s)	Área (m <sup>2</sup> )	Largura (m)	Profundidade Média(m)	Perímetro (m)	Raio Hidráulico (m)
1	24/06/74	15:48	0,38	0,665	0,594	1,120	4,80	0,23	5,02	0,22
2	24/06/74	16:11	0,38	0,726	0,661	1,098	4,80	0,23	5,01	0,22
3	14/07/74	10:32	0,32	0,375	0,445	0,842	4,72	0,18	4,81	0,18
4	14/07/74	10:46	0,32	0,352	0,404	0,872	4,72	0,18	4,81	0,18
5	24/7/74	11:45	0,30	0,375	0,433	0,867	4,70	0,18	4,78	0,18
6	24/07/74	11:55	0,30	0,404	0,446	0,906	4,70	0,19	4,79	0,19
7	03/08/74	10:46	0,30	0,374	0,411	0,911	4,70	0,19	4,83	0,19
8	03/08/74	11:10	0,30	0,353	0,375	0,943	4,70	0,20	4,83	0,20
9	24/08/74	14:30	0,29	0,356	0,437	0,816	4,50	0,18	4,65	0,18
10	24/08/74	14:53	0,29	0,362	0,434	0,835	4,50	0,19	4,62	0,18
11	30/08/74	14:55	0,29	0,370	0,440	0,842	4,50	0,19	4,63	0,18
12	31/08/74	15:04	0,27	0,428	0,459	0,932	3,80	0,25	3,96	0,24
13	31/08/74	15:30	0,275	0,428	0,458	0,934	3,80	0,25	3,97	0,24
36	01/10/74	09:15	0,22	0,346	0,396	0,873	4,00	0,22	4,16	0,21
37	03/10/74	10:52	0,21	0,386	0,428	0,902	4,00	0,23	4,09	0,22
38	03/10/74	11:32	0,21	0,377	0,421	0,895	4,00	0,22	4,20	0,21
39	04/10/74	10:38	0,26	0,457	0,436	1,049	4,00	0,26	4,25	0,25
40	04/10/74	11:30	0,22	0,420	0,412	1,019	4,00	0,25	4,24	0,24
41	08/10/74	07:10	0,21	0,368	0,416	0,885	4,00	0,22	4,19	0,21
42	08/10/74	07:10	0,21	0,370	0,410	0,902	4,00	0,23	4,22	0,21
43	09/10/74	08:55	0,21	0,367	0,407	0,902	4,00	0,23	4,19	0,22
44	09/10/74	09:45	0,21	0,357	0,397	0,900	4,00	0,22	4,22	0,21
45	10/10/74	17:10	0,21	0,373	0,406	0,919	4,00	0,23	4,19	0,22
46	10/10/74	17:58	0,21	0,358	0,394	0,909	4,00	0,23	4,21	0,22
47	11/10/74	10:50	0,21	0,423	0,441	0,959	4,00	0,24	4,20	0,23
48	11/10/74	17:50	0,20	0,394	0,429	0,919	4,00	0,23	4,19	0,22
49	12/10/74	12:50	0,21	0,417	0,432	0,966	4,00	0,24	4,21	0,23
50	12/10/74	13:30	0,21	0,438	0,469	0,935	4,00	0,23	4,24	0,22
51	16/10/74	16:07	0,21	0,427	0,462	0,925	4,00	0,23	4,21	0,22
52	16/10/74	16:45	0,22	0,417	0,473	0,882	3,85	0,23	3,93	0,22
53	18/10/74	16:34	0,20	0,402	0,471	0,853	4,00	0,21	4,18	0,20
54	18/10/74	17:00	0,20	0,384	0,444	0,865	4,00	0,22	4,17	0,21
55	21/10/74	15:00	0,19	0,391	0,467	0,837	4,00	0,21	4,18	0,20
56	21/10/74	15:41	0,19	0,388	0,460	0,844	4,00	0,21	4,19	0,20
57	26/10/74	11:20	0,36	0,547	0,508	1,078	4,40	0,24	4,54	0,24
58	28/10/74	08:40	0,29	0,417	0,513	0,812	4,00	0,20	4,23	0,19
59	28/10/74	09:25	0,29	0,436	0,566	0,770	4,00	0,19	4,25	0,18
60	30/10/74	09:00	0,26	0,457	0,557	0,822	4,00	0,21	4,10	0,20
61	30/10/74	09:31	0,26	0,433	0,492	0,881	4,00	0,22	4,05	0,22

Com esses valores será estabelecida a curva-chave do Córrego Vinte e Um, com a qual se pode obter as vazões diárias das leituras das réguas linimétricas durante o ciclo hidrológico estudado. O procedimento para determinar a curva-chave consiste em encontrar a relação entre os valores de cota (nível d'água) e a vazão medida. Para isso as equações comumente encontradas na literatura são:

$$Q_{est} = a \times (h - h_0)^b \quad (4.1)$$

onde  $Q_{est}$  representa a vazão líquida estimada,  $h_0$  é o valor da cota média diária  $h$  correspondente à vazão nula, e  $a$  e  $b$  correspondem a parâmetros de calibração.

$$Q_{est} = K \times A \times R^{2/3} \times S^{1/2} \quad (4.2)$$

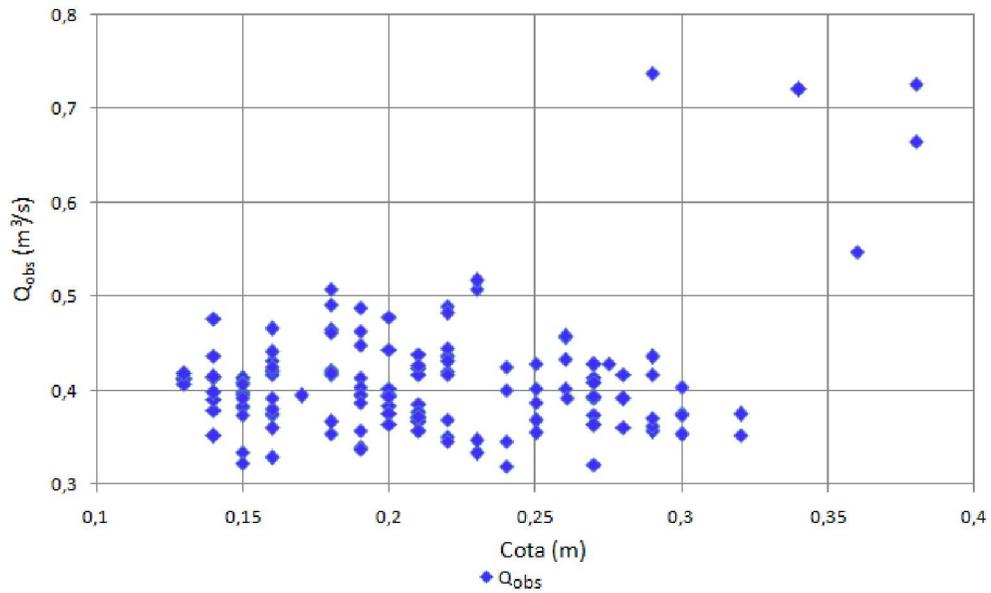
Equação de Manning-Strickler, onde  $K$  corresponde a um parâmetro de calibração que deriva da rugosidade da parede;  $A$  a área de seção transversal,  $R$  é o raio hidráulico, e  $S$  a declividade da linha d'água.

A Equação (4.1) é do tipo potência e corresponde à equação de ajuste mais utilizada pela facilidade na sua determinação, mediante um processo de linearização, utilizando logaritmo, e seus parâmetros podem ser calculados pelo método dos mínimos quadrados. A Equação (4.2) corresponde à equação de Manning-Strickler. A dificuldade na Equação de Manning-Strickler deve-se à necessidade de se terem valores das características hidráulicas da seção, como área, raio hidráulico e declividade, para período de estudo.

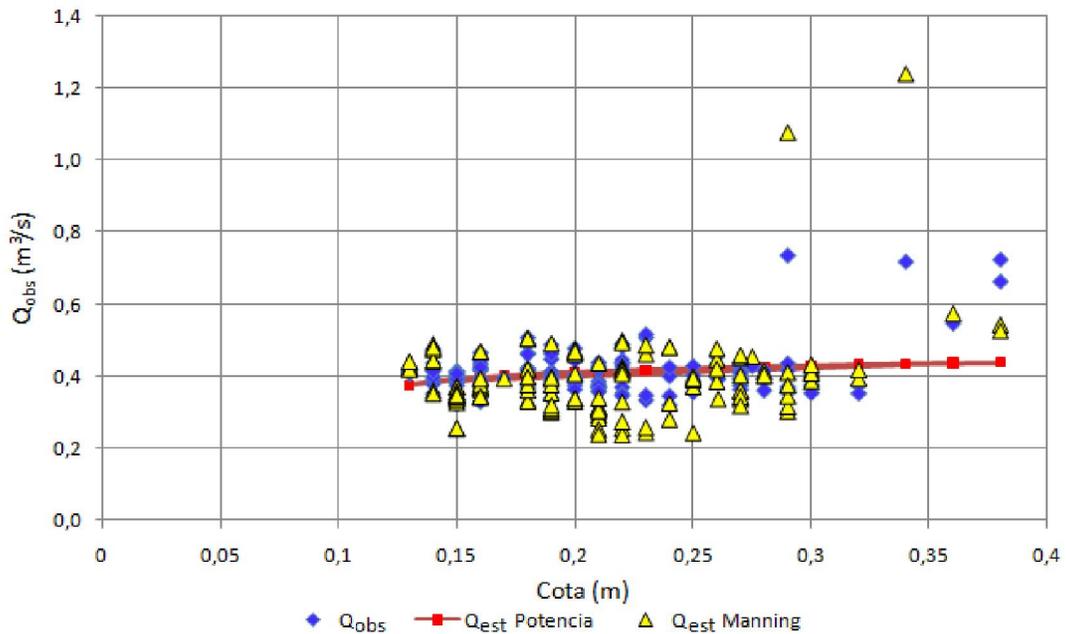
Foram testadas estas duas equações com os dados do Córrego Vinte e Um não se obtendo bons resultados. Isso por que cada valor da cota está associado a diferentes valores de vazão, não existindo uma relação unívoca entre as variáveis dependente e independente, conforme apresentado na **Figura IV.14**, a seguir.

Nesta simples análise linear pôde-se observar que não existe correlação entre os valores observados no Córrego Vinte e Um destas duas variáveis. A variação da vazão não é representada pela variação dos níveis d'água. Na **Figura IV.15**, a seguir, apresentam-se os valores observados de vazão (símbolo azul) comparados com os valores de vazão estimados com as equações de Potência (símbolo vermelho) e Manning-Strickler (triângulos verdes).

Verifica-se que a Equação de Manning-Strickler permite acompanhar o comportamento dos valores observados de vazão, mas como já se mencionou, o problema está na dificuldade de utilizar esta equação para extrapolar os valores de vazão para todo o ciclo hidrológico, utilizando os valores de cota. Desta forma, foi preciso tentar outra técnica para a determinação da curva chave, conforme descrito a seguir.



**Figura IV.14 – Relação entre cota e vazão do Córrego Vinte e Um**



**Figura IV.15 – Comparação entre os valores de vazões líquidas estimadas e observadas**

### IV.2.1 Modelos aditivos generalizados (MAG)

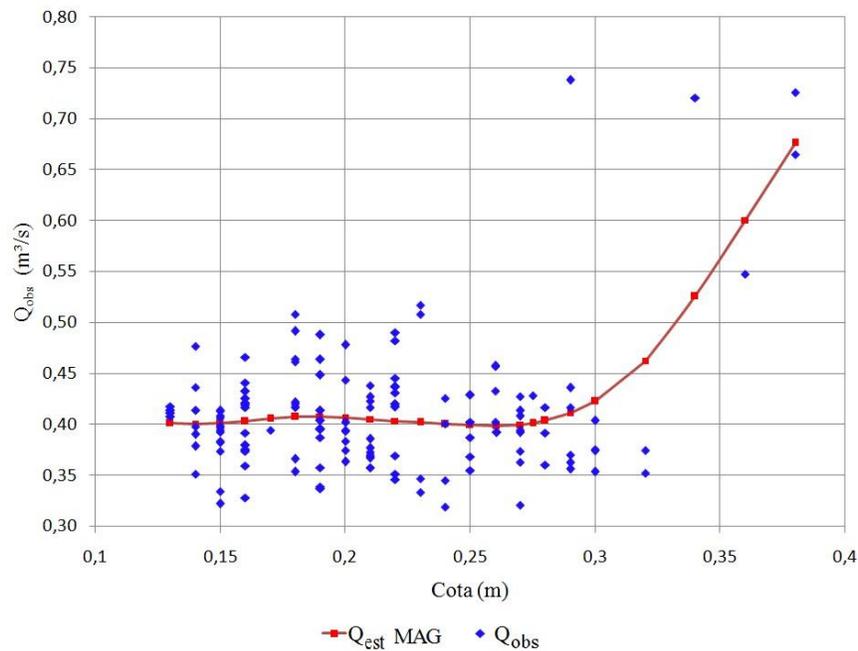
Os Modelos Aditivos Generalizados (MAG) correspondem a um método estatístico que permite ajustar funções onde se tem uma variável dependente ou variável resposta associada a diferentes variáveis independentes ou explanatórias. Este tipo de função permite associar as variáveis independentes de forma não-paramétrica ao contrario de funções lineares, permitindo uma maior flexibilidade no ajuste do modelo. Este método foi desenvolvido por Hastie e Tibshirani em 1990 e corresponde a uma extensão do método chamado Modelos Lineares Generalizados (MLG) onde só se tem a componente linear. Um MAG pode ser descrito da seguinte forma:

$$Y = \alpha + s_1(x_1) + s_2(x_2) + \dots + s_k(x_k) + \varepsilon \quad (4.3)$$

O parâmetro  $\alpha$  corresponde ao intercepto, o parâmetro  $\varepsilon$  corresponde ao erro do modelo, considerando-se que este segue uma lei normal de distribuição. A função  $s_j(x_j)$ ,  $j= 1,2,\dots,k$ , não é especificada e é estimada graficamente mediante uma curva ajustada com métodos como: médias móveis, loess (*locally weight e drunning line smoothers*) e *spline* (B-, regressão, *cubice natural*).

Foi utilizado o *Software* estatístico livre R que contém um pacote de rotinas para criar um modelo a partir dos dados das variáveis independentes e resposta. Neste caso foi utilizado um modelo com uma só variável independente, a cota, frente à variável resposta ou resposta, a vazão líquida. Utilizou-se o método de ajuste *cubic-spline* para determinação deste modelo obtendo-se o resultado de vazões estimadas, apresentado na **Figura IV.16**, a seguir.

Observa-se que o modelo gerado pelo método MAG ajusta-se corretamente ao comportamento dos valores de vazão observados, demonstrando a não linearidade entre o comportamento da vazão em função dos valores da cota. A **Tabela IV.4**, a seguir, apresenta uma comparação entre as equações utilizadas para a determinação da curva chave.



**Figura IV.16 – Valores de vazões líquida estimada pelo MAG**

**Tabela IV.4 – Comparação entre as equações de curva chave**

	<b>Manning-Strickler</b>	<b>Potência</b>	<b>Modelo MAG</b>
Erro Médio Quadrático	0,889	0,596	0,398
Coefficiente de Determinação R <sup>2</sup>	0,587	0,044	0,362

Os critérios adotados para comparar os ajustes das equações utilizadas na estimativa da vazão líquida foram: o erro médio quadrático e coeficiente de determinação R<sup>2</sup>.

O erro médio quadrático numa estimativa corresponde ao somatório da diferença ao quadrado entre cada valor da curva ajustada e o valor estimado, ponderado pelo número de valores da amostra. Um modelo é não tendencioso, quando o erro médio quadrático é igual à variância. O coeficiente de determinação corresponde a uma medida de ajuste linear entre os valores estimados por um modelo e os valores reais. O R<sup>2</sup> varia entre 0 e 1 sendo que o valor 1 representa o ajuste perfeito. Ele é utilizado para saber quanto dos dados reais está sendo explicado pelo modelo estimador (WALPOLE e MYERS, 1992).

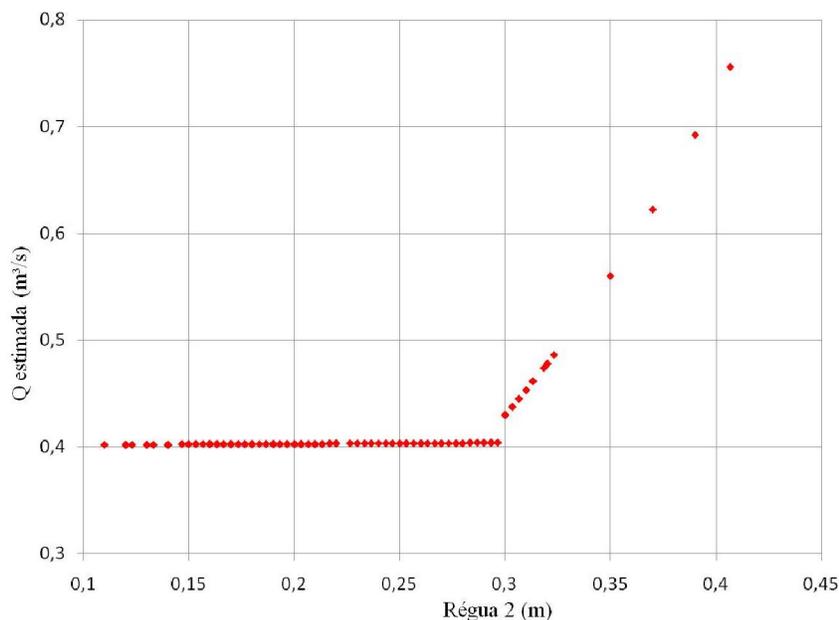
Embora não tenha apresentado a melhor correlação entre os três métodos, o MAG diminuiu a soma do erro quadrático. Como já se mencionou, a dificuldade de se

aplicar a equação de Manning-Strickler deve-se ao fato de não se ter os valores dos fatores necessários para calcular a vazão líquida diária durante todo o ciclo hidrológico, o que poderia ser feito no caso da utilização do MAG. Porém, a dificuldade do método estatístico está no fato de não existir uma explicação física para o intervalo de valores de cota entre 0,19 e 0,26m, onde os valores de vazão decrescem com o aumento da cota. Desta forma, decidiu-se dividir os dados em dois grupos, o primeiro constituído dos valores de cota 0,13 até o valor de cota 0,26 metros, onde foi ajustada uma reta, apresentada na Equação (4.4) a seguir, determinada pela relação entre cotas e vazões estimadas pelo MAG neste intervalo de valores. Para o intervalo seguinte, que corresponde aos valores superiores à cota 0,27 m será utilizada a expressão exponencial (4.5) que foi ajustada aos valores obtidos com o método do MAG.

$$Q = 0,01 \times h + 0,401 \quad \text{para } 0,13 < h < 0,30 \quad (4.4)$$

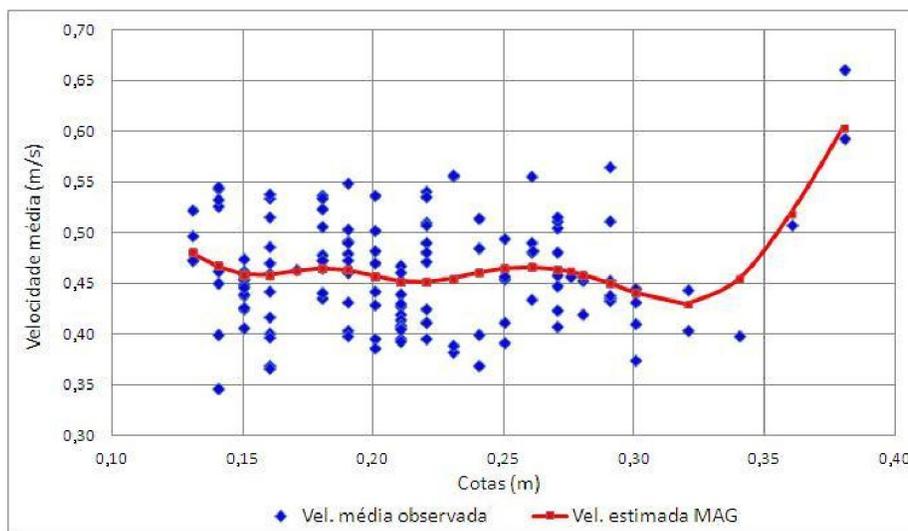
$$Q = 0,088 \times e^{5,289 \times h} \quad \text{para } h \geq 0,30 \quad (4.5)$$

Desta forma, os resultados no intervalo entre cota 0,13 até o valor de cota 0,30 m não apresentam uma variação significativa na vazão, com o aumento do valor da cota. Na **Figura IV.17**, a seguir, apresentam-se os valores estimados de vazão para o ciclo hidrológico. Da mesma forma que foi realizada esta análise com a variável vazão, mediante a utilização dos modelos aditivos generalizados, pode-se avaliar o comportamento da velocidade média, através da seção transversal de medidas, em relação à variável cota. Será possível calcular os valores de velocidade média para todo o ciclo hidrológico, o que permitiu utilizar as diferentes fórmulas de estimativa do transporte de sedimentos por arraste, para todo o ciclo hidrológico em estudo, permitindo obter-se a taxa de transporte anual.



**Figura IV.17 – Estimativa da vazão líquida para o ciclo hidrológico**

Na **Figura IV.18**, apresenta-se a relação entre os valores de cota e os valores de velocidade média determinados nas medições de vazão para do Córrego Vinte e Um. Junto com os valores observados apresentam-se os valores estimados da velocidade obtidos pelo MAG.



**Figura IV.18 – Relação da conta com a velocidade média**

Observa-se a não linearidade na relação entre estas variáveis. Novamente repete-se o fato de surgir uma série de valores diferentes de velocidade média para cada valor de cota. Por outro lado, os valores gerados pelo MAG representam o

comportamento geral da série de dados de velocidades, evidenciando a não linearidade da relação existente entre estas variáveis. Trata-se de uma situação comum em rios devido à grande influência das variações da morfologia do leito sobre as variáveis hidráulicas. A determinação desta relação não linear entre a cota e a velocidade média permite calcular os valores para o ciclo hidrológico completo utilizando a série de valores de nível d'água disponíveis.

### **IV.3 DADOS SEDIMENTOLÓGICOS**

A coleta de dados sedimentológicos faz parte da segunda etapa da metodologia proposta para o estudo do movimento de sedimentos em escoamentos com superfície livre. As amostragens realizadas na seção de medidas do trecho representativo e constam de:

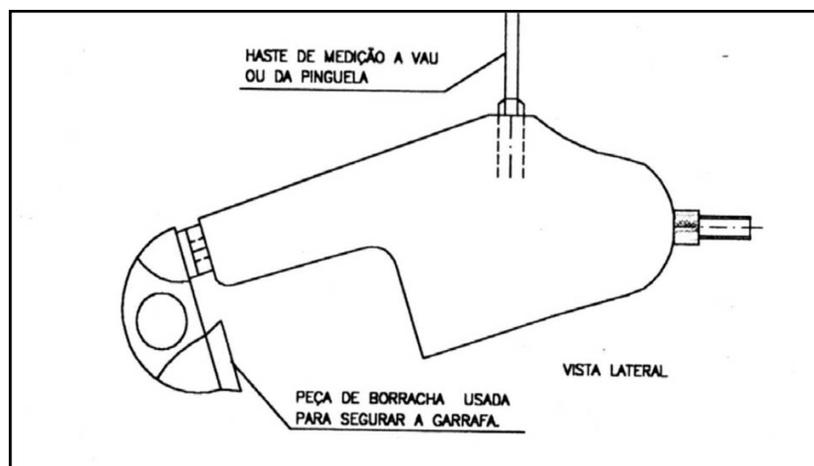
- Sedimentos em suspensão;
- Sedimentos do fundo, e
- Sedimentos por arraste.

#### **IV.3.1 Sedimentos em Suspensão**

As amostragens de sedimentos em suspensão fazem parte das campanhas diárias. A razão para realizar as amostragens de forma diária é que as variações das características físicas e químicas dos sedimentos em suspensão são a resposta mais rápida do escoamento às intervenções realizadas na bacia hidrográfica pelo homem (WILSON-JR., 1999 *apud* NERY, 2002).

As amostras foram obtidas diariamente na seção de medidas por um observador local, utilizando um amostrador de água e sedimentos, integrador na vertical, com bocal de  $\frac{1}{4}$  de polegada de diâmetro, do tipo USDH-48 como se pode observar na **Figura IV.19**, a seguir:

Obtiveram-se a concentração e granulometria dos sedimentos em suspensão. As amostras foram colhidas diariamente, integradas em verticais situadas a  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  e  $\frac{3}{4}$  da largura total, ou seja, na margem direita, no centro e na margem esquerda do curso d'água. Estes valores estão disponíveis nas memórias de campo do projeto do Rio Ivaí.



**Figura IV.19 – Desenho do amostrador de sedimentos do tipo USDH-48 integrado na vertical, usado para amostrar sedimento em suspensão (NERY, 2002)**

Os dados de sedimentos em suspensão foram digitalizados a partir das tabelas originais, onde foram realizados os cálculos para determinação da concentração de sedimentos na amostra.

No total foram obtidas 427 amostras de sedimentos em suspensão compreendidas entre as datas 26/06/1974 e 12/03/1976. Em conjunto com os dados de sedimentos, foram anotados os valores das cotas medidas no momento da coleta da amostra de sedimento, permitindo assim comparar e cotejar com os valores registrados da Régua N° 2, que corresponde à régua na seção de medidas.

As amostras de sedimento foram enviadas para os laboratórios de sedimentometria da Administração de Recursos Hídricos – ARH, em Curitiba, Paraná; do Instituto de Pesquisas Radioativas – IPR, e, para o Laboratório de Sedimentometria da Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais – CPRM, estes dois últimos em Belo Horizonte, Minas Gerais. Nesses laboratórios foram determinadas a concentração e a granulometria dos sedimentos em suspensão e do leito.

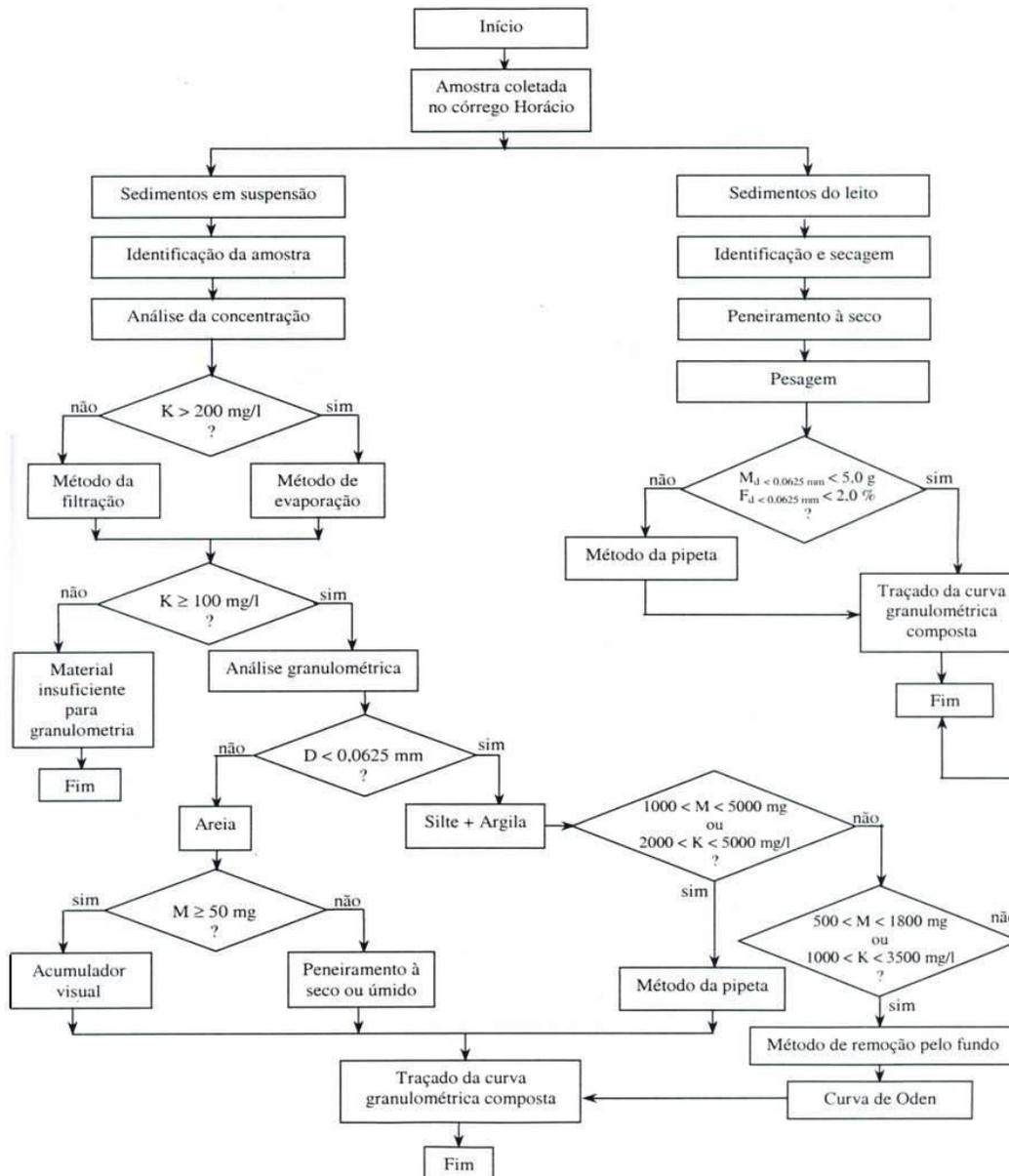
As análises do material sólido seguiram as Normas e Recomendações Hidrológicas apresentadas em DNAEE (1970) e, posteriormente, em ANEEL (2000).

Na **Tabela IV.5**, apresenta-se parte da tabela com as concentrações dos sedimentos em suspensão.

**Tabela IV.5 – Concentrações de Sedimento em Suspensão do Córrego Vinte e Um**

N° amostra	Dados da Amostra				Concentração (mg/l)		
	Data	Hora	Cota (m)	Largura (m)	Sed. Suspensão	Sed. Dissolvidos	Sed. Totais
1	24/06/74	10:45	0,38	4,70	08,99		08,99
2	24/06/74	16:57	0,38	4,80	10,29		10,29
3	25/06/74	13:44	0,38	4,80	16,46		16,46
4	26/06/74	13:34	0,38	4,80	12,68		12,68
5	27/06/74	14:55	0,39	4,80	13,04		13,04
6	28/06/74	15:34	0,36	4,80	17,69		17,69
7	29/06/74	15:15	0,36	4,80	16,68		16,68
8	30/06/74	15:20	0,36	4,80	17,26		17,26
9	01/07/74	16:35	0,34	4,80	20,60		20,60
10	02/07/74	15:45	0,34	4,80	11,90		11,90
11	03/07/74	14:30	0,34	4,80	13,34		13,34
12	04/07/74	09:34	0,34	4,80	12,21		12,21
13	05/07/74	14:35	0,35	4,80	20,58	30,00	50,58
14	06/07/74	14:00	0,35	4,80	18,71	56,66	75,367
15	07/07/74	14:00	0,35	4,80	25,03	38,33	63,36
16	08/07/74	15:45	0,35	4,80	33,50	85,00	118,50
17	09/07/74	14:30	0,32	4,80	21,42	83,33	104,75
18	10/07/74	14:15	0,32	4,80	14,22	26,66	40,88
19	11/07/74	14:20	0,32	4,80	24,58	16,66	41,24
20	12/07/74	14:30	0,32	4,80	17,56	28,33	45,89
21	13/07/74	14:20	0,32	4,80	21,68	51,66	73,34
22	14/07/74	11:07	0,32	4,72	21,56	21,56	43,12
23	15/07/74	12:00	0,32	4,72	19,03	50,00	69,03
24	16/07/74	12:05	0,32	4,72	22,12	41,66	63,78
25	17/07/74	12:00	0,32	4,72	26,74	13,33	40,07
26	18/07/74	11:55	0,32	4,72	21,52	31,66	53,18
27	19/07/74	12:30	0,32	4,72	15,02	41,66	56,68
28	20/07/74	12:30	0,32	4,72	20,49	58,33	78,82
29	21/07/74	16:52	0,3	4,72	23,30	78,33	101,63
30	22/07/74	13:05	0,31	4,72	13,32	75,00	88,32
31	23/07/74	13:30	0,31	4,72	13,61	66,67	80,28
32	24/07/74	11:12	0,30	4,7	3,35	08,89	12,24
33	25/07/74	13:20	0,30	4,72	20,52	66,67	87,19

Em conjunto com os procedimentos e normas adotados (DNAEE, 1970; ANEEL, 2000), os quais estão resumidos no diagrama de blocos da **Figura IV.20**, a determinação granulométrica dos sedimentos em suspensão foi realizada para amostras cuja concentração de sedimentos em suspensão foi igual ou maior que 100 mg/L.



**Figura IV.20 – Análise das amostras de sedimentos do Córrego Vinte e Um (WILSON-JR. *et al.*, 1980; NERY, 2002)**

Na **Tabela IV.6**, apresentam-se os resultados dos valores de diâmetros característicos de sedimentos em suspensão de quatro amostras do Córrego Vinte Um.

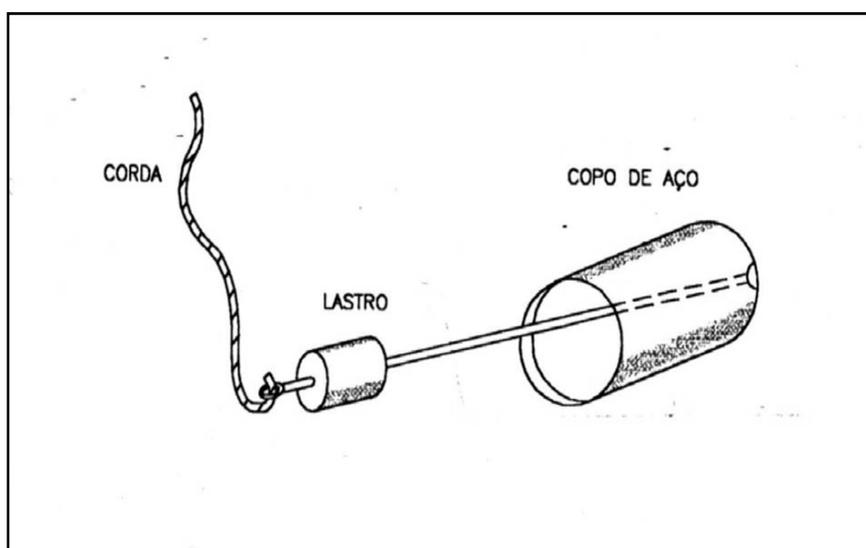
**Tabela IV.6 – Valores dos diâmetros característicos (mm) para o sedimento em suspensão**

Data	D <sub>10</sub>	D <sub>16</sub>	D <sub>35</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>65</sub>	D <sub>84</sub>	D <sub>90</sub>
16/10/1974	-	-	-	0,080	0,101	0,111	0,150	0,165
31/10/1974	-	-	0,104	0,153	0,180	0,194	0,250	0,280
13/11/1974	-	-	-	0,047	0,068	0,076	0,116	0,130
03/05/1975	-	0,067	0,121	0,158	0,188	0,208	0,298	0,333

### IV.3.2 Amostragem de Sedimento do Leito

As amostragens de sedimentos do leito fizeram parte das campanhas periódicas, já que as variações das características do sedimento de fundo ocorrem de maneira mais lenta do que os sedimentos em suspensão.

A amostragem foi realizada pelos hidrometristas utilizando o amostrador tipo “Rock Island”, como apresentado na **Figura IV.20**:



**Figura IV.20 – Desenho do amostrador tipo “Rock Island” para sedimento do leito (NERY, 2002)**

De um modo geral, o sedimento do leito apresenta uma granulometria maior do que o sedimento em suspensão. Os dados obtidos das curvas granulométricas do sedimento de fundo correspondem aos diâmetros característicos D<sub>10</sub>, D<sub>16</sub>, D<sub>35</sub>, D<sub>50</sub>, D<sub>60</sub>, D<sub>65</sub>, D<sub>84</sub> e D<sub>90</sub>, os quais representam a porcentagem em peso dos grãos que compõem a amostra e que possuem dimensões inferiores aos valores correspondentes.

Com os valores desses diâmetros são calculados os coeficientes adimensionais de uniformidade  $\sigma_1$ , e de gradação  $\sigma_2$  definido pelas seguintes expressões, respectivamente:

$$\sigma_1 = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (4.6)$$

Enquanto o coeficiente de gradação  $\sigma_2$ , definido por:

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{D_{84}}{D_{50}} + \frac{D_{50}}{D_{16}} \right) \quad (4.7)$$

corresponde ao desvio padrão em torno do diâmetro médio dos grãos de sedimentos, cuja curva granulométrica é representada por uma lei de distribuição de frequência log-normal.

No caso dos dados do Córrego Vinte e Um, foram coletadas 112 amostras de sedimento do. Na **Tabela IV.7**, apresentam-se um resumo dos valores dos diâmetros característicos dos sedimentos do fundo. Apresentam-se relativo ao período de 03/09/1974 a 08/11/1974.

### **IV.3.3 Amostragem de Sedimento em Movimento por Arraste**

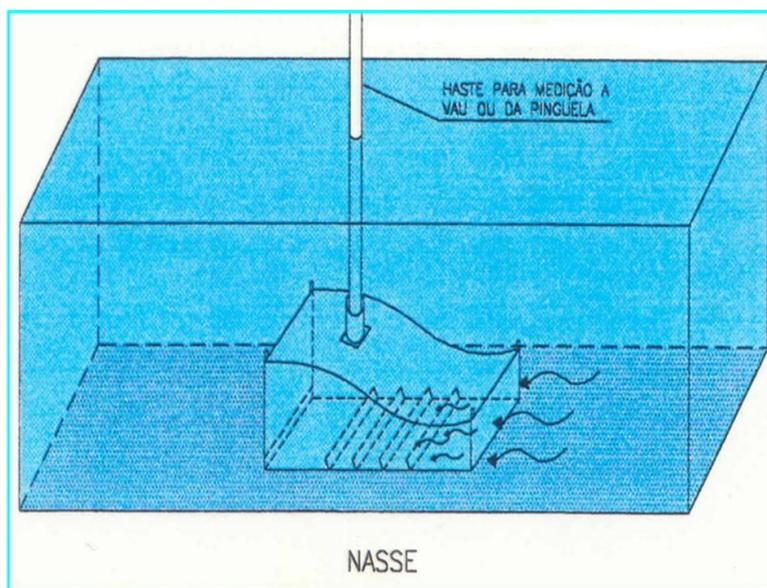
Tal como os sedimentos do fundo, as amostragem de sedimentos em movimento por arraste fazem parte das medidas realizadas durante as campanhas periódicas descritas na metodologia. O amostrador consiste de uma armadilha colocada no fundo do escoamento que captura os sedimentos que se movimentam por arraste. A seguir, na **Figura IV.21**, apresenta-se um desenho do amostrador de sedimentos em movimento por arraste, denominado Nasse (armadilha, em francês).

Analogamente ao caso dos sedimentos do fundo, são determinadas as curvas granulométricas, os diâmetros característicos e calculados os coeficientes de uniformidade e de gradação, descritos anteriormente. Para o Córrego Vinte e Um foram extraídas 331 amostras de sedimentos por arraste durante o período de 02/04/1974 e 22/07/1975.

Na **Tabela IV.8**, apresentam-se parte dos resultados dos diâmetros característicos para as amostras de sedimentos transportados por arraste. O restante dos dados está apresentado no **Anexo I**.

**Tabela IV.7 – Diâmetros Característicos do sedimento de fundo, no Córrego Vinte e Um**

Dados da Amostra			Diâmetros Característicos (mm)								Coef. de Uniformidade	Coef. de Gradação
Data	Cota (m)	Local	D <sub>10</sub>	D <sub>16</sub>	D <sub>35</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>65</sub>	D <sub>84</sub>	D <sub>90</sub>	$\sigma_1$	$\sigma_2$
3/9/1974	0,35	ME	0,132	0,15	0,204	0,251	0,285	0,302	0,41	0,461	2,159	1,653
3/9/1974	0,35	Centro	0,131	0,143	0,179	0,209	0,232	0,247	0,335	0,379	1,771	1,532
3/9/1974	0,35	MD	0,179	0,195	0,247	0,291	0,32	0,335	0,424	0,479	1,788	1,475
4/9/1974		MD	0,178	0,198	0,244	0,28	0,306	0,324	0,425	0,476	1,719	1,466
4/9/1974		Centro	0,131	0,147	0,192	0,23	0,257	0,273	0,361	0,421	1,962	1,567
4/9/1974		ME	0,17	0,19	0,242	0,283	0,315	0,331	0,409	0,456	1,853	1,467
21/9/1974		MD	0,142	0,16	0,201	0,239	0,269	0,286	0,381	0,44	1,894	1,544
21/9/1974		Centro	0,16	0,179	0,226	0,265	0,299	0,32	0,419	0,466	1,869	1,531
21/9/1974		ME	0,151	0,166	0,201	0,229	0,253	0,27	0,338	0,385	1,675	1,428
30/10/1974	0,26	ME	0,197	0,228	0,292	0,335	0,361	0,376	0,46	0,504	1,832	1,421
30/10/1974	0,26	Centro	0,198	0,23	0,291	0,335	0,368	0,384	0,48	0,513	1,859	1,445
30/10/1974	0,26	MD	0,192	0,22	0,284	0,334	0,369	0,382	0,464	0,503	1,922	1,454
1/11/1974	0,22	Centro	0,191	0,216	0,28	0,328	0,361	0,379	0,468	0,504	1,890	1,473
1/11/1974	0,22	ME	0,193	0,219	0,278	0,32	0,347	0,366	0,46	0,502	1,798	1,449
4/11/1974	0,2	MD	0,201	0,232	0,296	0,338	0,363	0,379	0,452	0,493	1,806	1,397
4/11/1974	0,2	Centro	0,187	0,218	0,282	0,327	0,355	0,371	0,47	0,51	1,898	1,469
6/11/1974	0,22	Centro	0,164	0,187	0,251	0,3	0,334	0,352	0,44	0,485	2,037	1,535
6/11/1974	0,22	ME	0,225	0,39	0,298	0,334	0,361	0,378	0,458	0,498	1,604	1,114
6/11/1974	0,22	MD	0,192	0,225	0,291	0,329	0,351	0,365	0,445	0,491	1,828	1,407
8/11/1974	0,19	MD	0,175	0,207	0,271	0,312	0,342	0,36	0,441	0,481	1,954	1,460



**Figura IV.21 – Amostrador de sedimentos em movimento por arraste**

**Tabela IV.8 – Diâmetros Característicos dos Sedimentos de Arraste**

Dados da Amostra						Diâmetros Característicos (mm)							
Data	Cota (m)	Amostra	Peso (g)	Tempo (hr:min)	Local	D <sub>10</sub>	D <sub>16</sub>	D <sub>35</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>60</sub>	D <sub>65</sub>	D <sub>84</sub>	D <sub>90</sub>
12/10/74	0,21	1 a 5	1452,10	01:30	ME	0,179	0,208	0,226	0,322	0,351	0,368	0,450	0,493
26/10/74	0,36	1	107,00	00:10	Centro	0,15	0,167	0,203	0,233	0,252	0,266	0,329	0,365
26/10/74		2	333,25		Centro	0,172	0,190	0,247	0,289	0,320	0,338	0,440	0,488
26/10/74		3	447,00		Centro	0,182	0,202	0,264	0,312	0,346	0,365	0,458	0,499
26/10/74		4	598,65		Centro	0,18	0,208	0,259	0,293	0,321	0,336	0,424	0,468
26/10/74		5	1152,40		Centro	0,178	0,197	0,257	0,304	0,332	0,347	0,430	0,470
30/10/74	0,26	1 a 5	1406,00	00:20	MD	0,236	0,263	0,314	0,349	0,377	0,391	0,478	0,510
1/11/74	0,19	1 a 5	1946,57	00:20	MD	0,213	0,245	0,303	0,338	0,360	0,376	0,460	0,500
1/11/74	0,22	1 a 5	798,73	00:25	Centro	0,155	0,176	0,247	0,288	0,322	0,339	0,440	0,489
1/11/74	0,22	1 a 5	1888,27	00:40	ME	0,21	0,235	0,298	0,345	0,375	0,391	0,479	0,512
4/11/74	0,20	1 a 5	1928,85	00:50	ME	0,241	0,270	0,328	0,362	0,388	0,401	0,479	0,511
6/11/74	0,22	1 a 5	1166,10	00:20	MD	0,180	0,208	0,274	0,320	0,351	0,371	0,455	0,494
6/11/74	0,20	1 a 5	717,80	00:30	Centro	0,149	0,168	0,224	0,275	0,309	0,328	0,425	0,473
6/11/74	0,22	1 a 5	2388,70	00:20	ME	0,240	0,261	0,305	0,339	0,367	0,382	0,465	0,505
8/11/74	0,60	1 a 5	1747,20	00:20	ME	0,227	0,251	0,304	0,339	0,364	0,380	0,460	0,498
8/11/74	0,19	1 a 5	597,27	00:20	Centro	0,151	0,168	0,235	0,272	0,308	0,323	0,412	0,459
9/11/74	0,19	1 a 5	933,53	00:30	MD	0,220	0,247	0,300	0,332	0,355	0,369	0,448	0,488
9/11/74	0,19	1 a 5	268,25	00:24	Centro	0,164	0,191	0,250	0,292	0,321	0,334	0,426	0,460

Observa-se nesta tabela que as colunas são diferentes daquelas usadas no sedimento do fundo. Isto porque, como se apresentou na **Figura IV.21**, o amostrador tem células separadas onde se coletamos sedimentos, assim, a coluna “amostra” representa a célula onde o material foi coletado. A coluna seguinte representa a soma dos “pesos” das 5 células de cada amostra. A coluna “tempo” corresponde ao tempo que o amostrador ficou depositado no leito. Sabendo-se que a largura do amostrador é igual a 0,4 m. determina-se, diretamente, a descarga sólida por arraste, por unidade de largura, no local amostrado (margens esquerda ou direita, centro). Isto é feito, dividindo-se o peso da amostra, pelo tempo de duração da coleta, pela largura do amostrador.

Do total das 331 amostras de sedimento em movimento por arraste, 20 amostras têm valores do peso e do tempo de duração da coleta, o que possibilitou o cálculo direto do transporte por arraste. Na **Tabela IV.9**, apresenta-se o resumo do cálculo direto do transporte por arraste.

**Tabela IV.9 – Cálculo direto do transporte por arraste**

Data	Cota (m)	Local	Peso (g)	Tempo (s)	q <sub>b</sub> (g/s/m)	q <sub>b</sub> (t/d/m)
6/9/1974			480,97	1620	0,742	0,064
7/9/1974	0,27	MD	2993,71	1800	4,158	0,359
7/9/1974		ME	284,31	3600	0,197	0,017
9/9/1974		Centro	754,42	4800	0,393	0,034
9/9/1974		MD	1029,17	1800	1,429	0,124
9/10/1974	0,21	Centro	2005,33	6000	0,836	0,072
12/10/1974	0,21	ME	1452,10	5400	0,672	0,058
26/10/1974	0,36	Centro	2638,30	600	10,993	0,950
30/10/1974	0,26	MD	1406,00	1200	2,929	0,253
1/11/1974	0,19	MD	1946,57	1200	4,055	0,350
1/11/1974	0,22	Centro	798,73	1500	1,331	0,115
1/11/1974	0,22	ME	1888,27	2400	1,967	0,170
4/11/1974	0,2	ME	1928,85	3000	1,607	0,139
6/11/1974	0,22	MD	1166,10	1200	2,429	0,210
6/11/1974	0,2	Centro	717,80	1800	0,997	0,086
6/11/1974	0,22	ME	2388,70	1200	4,976	0,430
8/11/1974	0,16	ME	1747,20	1200	3,640	0,314
8/11/1974	0,19	Centro	597,27	1200	1,244	0,108
9/11/1974	0,19	MD	933,53	1800	1,297	0,112
9/11/1974	0,19	Centro	268,25	1440	0,466	0,040

As descargas sólidas por arraste, medidas diretamente com a “Nasse”, em unidades de força por unidades de comprimento e de tempo [ $F L^{-1} T^{-1}$ ], no período de 06/09/74 a 09/11/74 (**Tabela IV.9**), apresentaram as seguintes faixas de valores:

- Margem esquerda: 0,017 a 0,430 t/d/m
- Centro: 0,034 a 0,930 t/d/m
- Margem direita: 0,112 a 0,359 t/d/m.

Constatou-se, também, que o movimento de sedimentos por arraste nem sempre ocorreu em toda a largura da seção de medidas do trecho representativo do Córrego Vinte e Um. As amostras de sedimentos foram enviadas para análise granulométrica, nos laboratórios de sedimentologia da Administração de Recursos Hídricos, ARH, em Curitiba, Paraná; no Instituto de Pesquisas Radioativas, e, no laboratório de sedimentometria da Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais, CPRM, os dois últimos em Belo Horizonte, Minas Gerais.

No próximo Capítulo serão apresentados os trabalhos realizados com traçadores radioativos, que constitui uma das medições especiais da campanha intensiva de medidas, da segunda etapa da Metodologia de Estudo do Movimento de Sedimentos em escoamentos com superfície livre.

## **CAPÍTULO V**

# **USO DOS TRAÇADORES RADIOATIVOS NO ESTUDO DO MOVIMENTO DE SEDIMENTOS EM CÓRREGOS E RIBEIRÕES**

O uso de traçadores radioativos constitui uma técnica muito útil e precisa para os estudos do movimento de sedimentos em escoamentos com superfície livre. Os radioisótopos permitem o levantamento das trajetórias, transporte e dispersão de partículas isoladas e grupos de partículas, tanto em canais de laboratório, quanto em escoamentos naturais, em ambientes fluvial, estuarino e marinho (WILSON-JR. *et al.*, 1980; NERY, 2002).

No Brasil, a utilização de traçadores radioativos em sedimentologia, iniciou-se no ano de 1968, com a realização, pelo então Instituto de Pesquisas Radioativas- IPR da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG e da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN, de uma experiência no Porto do Rio de Janeiro, para a escolha dos locais de lançamento de material dragado dos canais de acesso e acostagem ao Porto.

No caso do estudo realizado na Bacia do Rio Ivaí, no Noroeste do Estado do Paraná, e mais especificamente no Córrego Vinte e Um, o uso dos traçadores radioativos se inseriu na Metodologia apresentada no Capítulo III, como uma Medição Especial, cujo objetivo foi a quantificação do movimento dos sedimentos do leito por arraste e em suspensão. Os trabalhos realizados no Córrego Vinte e Um com uso de radioisótopos são apresentados neste capítulo.

### **V.1 O USO DE TRAÇADORES RADIOATIVOS NO CÓRREGO VINTE E UM**

Para o estudo com traçadores radioativos no Córrego Vinte e Um, o trecho de medidas teve que ser preparado e equipado para a realização das medições hidrodinâmicas e sedimentológicas, as quais foram realizadas, simultaneamente, com as aplicações de radioisótopos.

As margens do trecho foram limpas e duas passarelas transversais foram instaladas para as medições hidrodinâmicas e amostragens de sedimentos. O trecho foi cercado para evitar que o gado viesse beber água.

Para as medições com traçadores radioativos, foram instalados, na margem esquerda, ao longo de 46,0 m do trecho de medidas, trilhos de madeira, sobre os quais se deslocava o carro detector de radiação, com três sondas de cintilação SPP3, de números 5, 7 e 9, penduradas. Numa área plana de 5 x 5 m<sup>2</sup>, sob uma tenda, foram colocados os aparelhos registradores das intensidades de radiação, e impressoras.

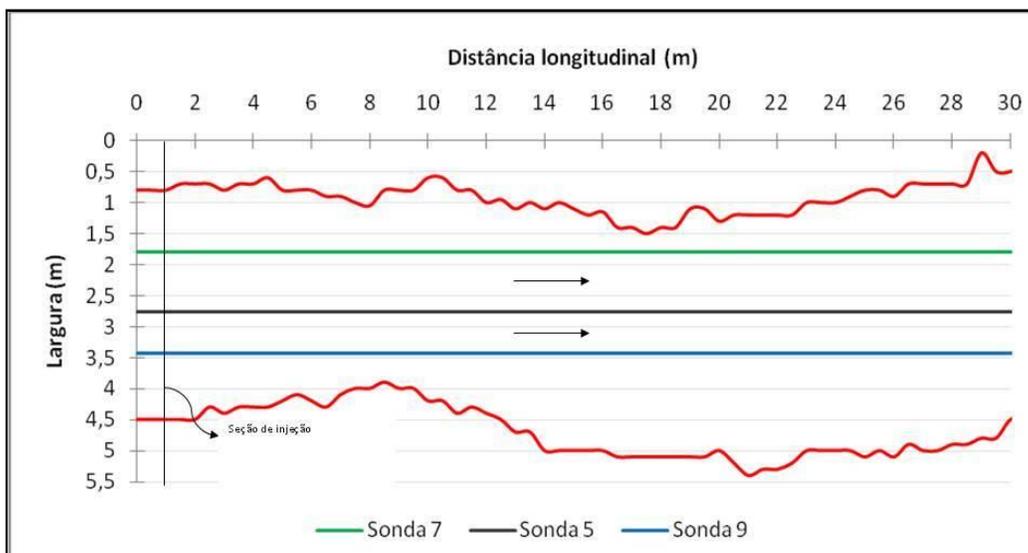
A **Figura V.1**, extraída dum filme Super-8 (WILSON-JR., 1980), ilustra os preparativos realizados no trecho representativo e de medidas do Córrego Vinte e Um, no Noroeste do Estado do Paraná.



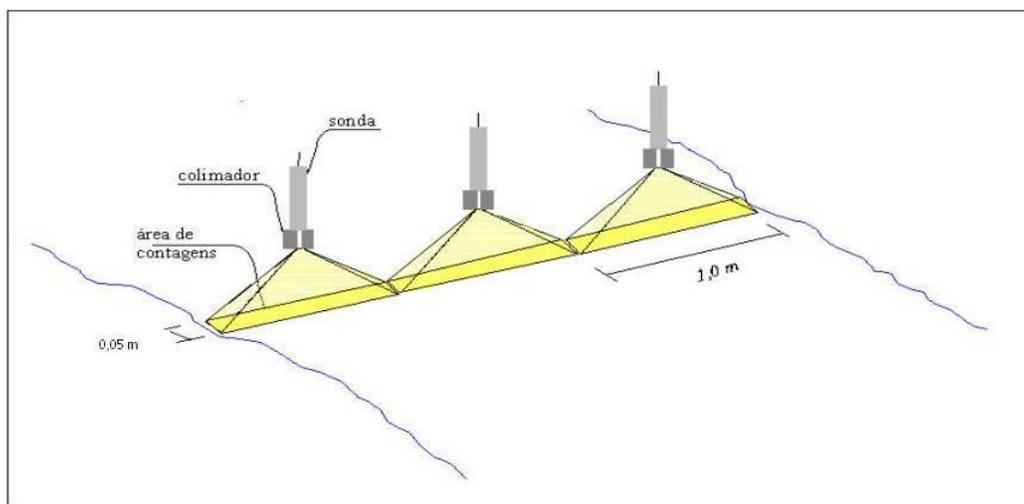
**Figura V.1 – Trecho Representativo do Córrego Vinte e Um (WILSON-JR., 1980)**

Tracionado sobre os trilhos de madeira, o carro de detecção deslocou-se ao longo do trecho de medidas, com uma velocidade constante. Na extremidade de cada sonda de radiação foi adaptado um colimador de chumbo que limitou a região de detecção para 1 metro de largura e 0,05 metros de comprimento. de forma que as três sondas cobrissem a quase-totalidade da largura do trecho, e o intervalo de comprimento igual 0,05 m. Desta forma, o trecho de medidas pode ser “escaneado” periodicamente, após a imersão do sedimento radioativo sobre o leito do escoamento.

Na **Figura V.2**, apresenta-se um esquema das trajetórias retilíneas das sondas no trecho de medidas do Córrego Vinte e Um. A distância percorrida pelas sondas foi de 30,0 m, em cada detecção. As distâncias transversais das posições das sondas foram medidas a partir do trilho de madeira instalado na margem esquerda. Na **Figura V.3**, seguinte, apresentam-se as regiões do leito (“vistas”) pelos detectores, delimitadas pelos colimadores de chumbo.



**Figura V.2 – Esquema de Posicionamento das Sondas no Trecho Representativo do Córrego Vinte e Um**



**Figura V.3 – Região de Detecção delimitada pelos Colimadores de Chumbo (WILSON-JR., 2003)**

Na extremidade a jusante do trecho de medidas, sobre o trilho, instalou-se o motor usado para tracionar um cabo de aço e movimentar, a velocidade constante de 2,72 m/min, o carrinho de detecção, de montante para jusante. Na extremidade de montante foi instalado um tambor provido de uma manivela, para o recolhimento manual do carrinho à seção inicial, após cada detecção.

### V.1.1 Escolha do Traçador Injetado no Córrego Vinte e Um

Vários radioisótopos podem ser obtidos nos Institutos de Pesquisas Radioativas, e utilizados para o estudo do movimento de sedimentos em escoamentos com superfície livre. A escolha do traçador é definida pelas dimensões das regiões a serem monitoradas; pelo tipo de sedimento; pelo processo de marcação e/ou simulação do material estudado; pela energia da radiação emitida e pela meia-vida do radioisótopo, que é o tempo necessário para que a atividade (número de emissões de radiação por unidades de massa e de tempo) do elemento radioativo se reduza à metade de seu valor inicial. Na **Tabela V.1**, estão relacionados os principais traçadores radioativos utilizados em Sedimentologia.

**Tabela V.1 – Principais traçadores radioativos utilizados em Sedimentologia (WILSON-JR. 2010)**

ISÓTOPOS	In <sup>113</sup>	Au <sup>198</sup>	Nd <sup>147</sup>	Cr <sup>51</sup>	Ir <sup>192</sup>	Sc <sup>46</sup>	Ta <sup>182</sup>
Meia Vida	103 min	2,7 d	11 d	27 d	74 d	84 d	111 d
Energia $\gamma$ (Mev)	0,360	0,410	0,090 (79%) 0,4 a 0,7 (21%)	0,320 (9%)	0,3 a 0,6 (28%)	0,9 a 1,1	1,0
Atividade Máxima (*)	~ 0,5 Ci ~2x10 <sup>10</sup> Bq	9 Ci 33x10 <sup>10</sup> Bq	~15 Ci 56x10 <sup>10</sup> Bq	40 Ci 150x10 <sup>10</sup> Bq	9,5 Ci 35x10 <sup>10</sup> Bq	10 Ci 37x10 <sup>10</sup> Bq	10,4 Ci 38x10 <sup>10</sup> Bq
Estado Físico-Químico	Solução (Vasas)	Solução (Vasas) (Areias) Vidro Moído (Areias)	Vidro Moído (Areias)	Solução (Vasas) Vidro Moído (Areias)	Vidro Moído (Areias)	Solução	Vidro Moído (Areias) Fio Metálico (Seixos)

(\*) CENS, CEA, França

A escolha do traçador radioativo para o estudo do movimento de sedimentos em córregos e ribeirões, é feita em função da meia vida do traçador radioativo. O traçador escolhido deve ter uma meia vida da ordem de 1 a 3 dias, de modo que o período máximo de decaimento do material injetado no trecho de estudo seja da ordem de 1 mês, no caso de acidente ou de movimento sólido reduzido. Normalmente, são realizadas várias injeções e experiências sequenciais no mesmo trecho do curso d'água. No caso do Córrego Vinte e Um, foram realizadas três experiências, com dois radioisótopos diferentes: Au-198 e Ir-192, cujas meias-vidas são iguais a 2,7 dias e 74 dias, respectivamente.

#### V.1.1.1 *Experiências com Ouro Radioativo- Au<sup>198</sup>*

Nas duas primeiras experiências realizadas no Córrego Vinte e Um foram utilizados sedimentos representativos do material do leito, marcados com Au<sup>198</sup>. O processo físico-químico de marcação está apresentado, detalhadamente, em WILSON-JR., 1972. Pequenas placas de ouro (20 a 30 mg) foram irradiadas no reator nuclear do então Instituto de Pesquisas Radioativas – IPR, da Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN, em Belo Horizonte, MG.

Antes da marcação com material radioativo, a amostra de areia representativa do leito móvel do córrego foi tratada com ácido nítrico e hidróxido de sódio, para a eliminação de carbonetos e sulfetos. Em seguida, a amostra é lavada e neutralizada com água destilada. Depois de secada a amostra, determina-se, por peneiramento, a curva granulométrica final do material a ser marcado. Nesta etapa, ainda são possíveis acertos nas massas de cada classe granulométrica, para a reprodução exata das porcentagens de cada classe granulométrica do sedimento de fundo.

Antes da marcação, o material passa por mais duas preparações, a primeira com Cloreto Estanoso e a segunda com Nitrato de Prata, que criam um depósito de prata de alguns angstroms na superfície dos grãos. O sedimento encontra-se marcado com prata inativa.

As placas de Au<sup>198</sup>, cerca de 25 mg para marcação de 200 g de areia, são dissolvidas em água régia, em seguida a solução é diluída e misturada com a areia marcada com a prata inativa. Ocorre uma reação química de dupla-troca, e o ouro radioativo se fixa na superfície dos grãos de areia, no lugar da prata inativa, que passa para a mistura líquida. As marcações foram realizadas no Laboratório de Radioisótopos do IPR/CNEN (WILSON-JR. *et al.*, 1980; NERY, 2002). A razão de selecionar o Au<sup>198</sup> deve-se à facilidade deste isótopo se fixar no sedimento, e também, pelo período de sua meia vida, 2,7 dias. Assim, três semanas (cerca de sete meias-vidas) após a experiência, o nível de radioatividade no leito do Córrego Vinte e Um seria da mesma ordem da radiação natural do sedimento de fundo, mesmo que o movimento de sedimentos tenha sido desprezível.

#### V.1.1.2 *Simulação do Sedimento com Vidro Moído Contendo Irídio<sup>192</sup>*

Na terceira injeção de material radioativo utilizou-se vidro moído contendo Ir<sup>192</sup>. O vidro moído tem a função de simular o sedimento do leito: possui uma

densidade específica muito próxima à da areia,  $2,67 \text{ g/cm}^3$ . A massa injetada foi composta de acordo com a curva granulométrica do material do leito do Córrego Vinte e Um. A irradiação do vidro moído, tal como a das placas de ouro, foi realizada no IPR/CNEN em Belo Horizonte, MG.

A principal razão para o uso do Irídio foi o estudo da distribuição dos sedimentos em profundidade e cálculo da espessura E da camada de transporte. A meia vida do  $\text{Ir}^{192}$  é de 74 dias, o que permite que as atividades das amostras de sedimentos de fundo, coletadas após as detecções do movimento de sedimentos radioativos, fossem enviadas para os Laboratórios de Radiometria, em Belo Horizonte, MG, e suas atividades determinadas durante várias semanas após os trabalhos de campo. Embora sua meia vida seja superior à do ouro, o material não interferiu nos estudos, já que o  $\text{Ir}^{192}$  só foi utilizado na última experiência realizada no Córrego Vinte e Um. Cabe destacar que as massas e as atividades dos traçadores, sempre estiveram bem abaixo do nível máximo permitido pela legislação ambiental.

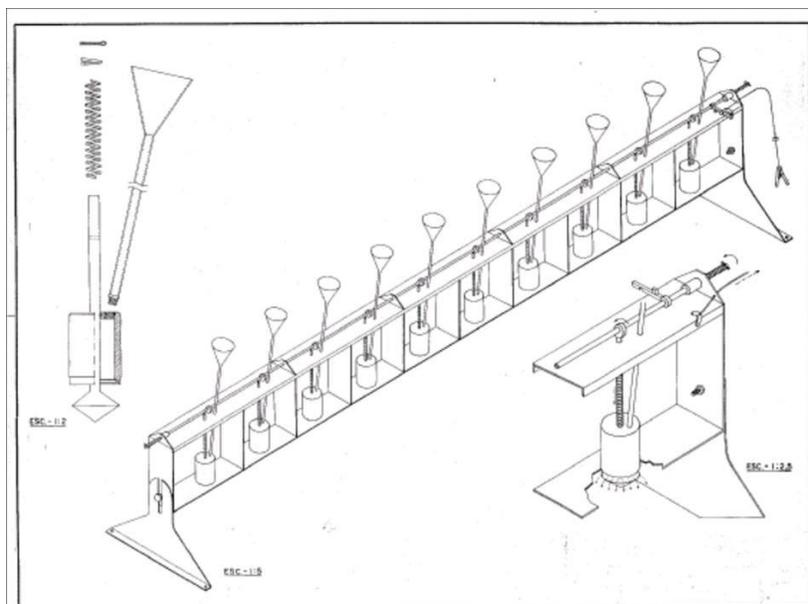
### V.1.2 Injeções Realizadas no Córrego Vinte e Um

Foram realizadas três injeções na seção 1 (um) do trecho de medidas, nos dias e horários apresentados na **Tabela V.2**.

**Tabela V.2 – Injeções Realizadas no Córrego Vinte e Um**

Injeção	Data	Hora	Traçador
Primeira	12/10/1974	12:08	Ouro – 198
Segunda	16/10/1974	11:23	Ouro – 198
Terceira	21/10/1974	17:28	Irídio – 192

As três injeções realizadas no Córrego Vinte e Um foram realizadas da mesma forma. O aparelho injetor apresentado na **Figura V.4**, é constituído de 10 funis de hastes prolongadas, por onde foi colocado o material radioativo. O aparelho foi depositado cuidadosamente no fundo do escoamento e o sedimento radioativos contido nos funis foi liberado simultaneamente, com uso de um dispositivo de disparo. (NERY, 2002). O manuseio do traçador foi realizado às margens do escoamento, de acordo com as Normas de Segurança da época, relativas ao uso de radioisótopos.



**Figura V.4 – Aparelho Injetor Utilizado no Córrego Vinte e Um (WILSON-JR., 1987, 1999)**

### **V.1.3 Deteções Realizadas no Córrego Vinte e Um**

Nas deteções realizadas no Córrego Vinte e Um foram utilizadas três sondas de cintilação SPP3, penduradas no carrinho de deteção que percorria o trecho apoiado sobre um trilho de madeira localizado na margem esquerda e sobre o cabo de aço estendido ao longo da margem oposta. Um cabo elétrico ligava cada sonda a um sistema de registros eletrônicos de dados, alimentado por um gerador a gasolina, modelo Honda.

Informações sobre as deteções realizadas no Córrego Vinte e Um são apresentas na **Tabela V.3**.

**Tabela V.3 – Informação sobre as Deteções Realizadas no Córrego Vinte e Um**

Injeção	Início Deteções		Fim Deteções		Nº Deteções
	Data	Hora	Data	Hora	
Primeira	12/10/74	12:24	14/10/74	15:22	30
Segunda	16/10/74	11:30	17/10/74	04:52	26
Terceira	21/10/74	17:31	22/10/74	11:34	23

## **V.2 CORREÇÕES DOS DADOS DE CAMPO**

Uma série de correções dos dados brutos obtidos nas experiências com traçadores radioativos, deve ser realizada para o cálculo da descarga sólida por arraste. Foram efetuadas as seguintes correções:

- dos valores impressos, para contagens por segundo;
- das contagens da Sonda 9 para padronização do posicionamento;
- do ruído de fundo (“background”);
- do decaimento radioativo;
- da eficiência das sondas;
- da velocidade das sondas.

### **V.2.1 Transformação dos Dados para Contagens por Segundo**

Os dados brutos impressos em fita de papel correspondem as contagens integradas em períodos de 3,3 segundos. A primeira correção corresponde à transformação destes dados para contagem por segundo, bastando para isso, dividir os valores das contagens integradas por 3,3 segundos.

### **V.2.2 Correções das Contagens da Sonda 9 para Padronização do Posicionamento**

Ao longo dos percursos das três sondas presas ao carrinho de detecção, o sistema automático de integração registrou números diferentes de saídas de valores entre duas seções consecutivas, distantes de um metro. As sondas 5 e 7, respectivamente do centro e da margem esquerda, apresentaram o mesmo número de valores entre as seções, porém, a sonda 9 da margem direita apresentou números diferentes. Tornou-se, então, necessário corrigir os valores da sonda 9 para que esta apresentasse a mesma quantidade de valores das outras duas sondas. A importância de se ter a mesma quantidade de valores, deve-se à conveniência de se trabalhar com as mesmas posições longitudinais para as três sondas. Para corrigir os valores, utilizou-se o polinômio de Lagrange que realiza uma interpolação linear. Desta forma, obtiveram-se os novos valores da sonda 9, com a mesma quantidade de valores entre as seções de 1 metro, tal que as sondas 5 e 7. Assim, as três sondas passaram a apresentar os valores das taxas de contagens (cps) na mesma posição ao longo do trecho de medidas. O polinômio de Lagrange é descrito pelas seguintes equações:

$$Y_{\text{nov}} = \sum_{i=1}^n Y_i L \quad (5.1)$$

onde,

$$L = \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \frac{(X_{\text{nov}} - X_k)}{(X_i - X_k)} \quad (5.2)$$

sendo  $n = \text{ordem} + 1$ . Neste caso  $n = 2$ , já que se trata duma interpolação linear.

### V.2.3 Correção do Ruído de Fundo

Corresponde à taxa de radiação natural do leito do escoamento, antes da injeção dos traçadores. Assim, nos trabalhos com traçadores radioativos são sempre realizadas detecções preliminares do ruído do fundo ou “*background*”. Esses valores são subtraídos dos valores da contagem dos traçadores radioativos obtidos após a injeção. Para cada sonda obtém-se um perfil longitudinal determinado antes de cada injeção o qual depende do tipo de material do leito (rochas, areias, vasas, etc.).

### V.2.4 Correções do Decaimento Radioativo

À medida que o tempo passa, as taxas de contagem emitidas pelo traçador radioativo diminuem, por decaimento, ou seja, os traçadores emitem radiação e as atividades que possuíam na hora da injeção diminuem. Torna-se necessário, então, eliminar essas perdas de contagem devido ao decaimento radioativo. As correções por decaimento são realizadas utilizando-se a lei exponencial de decaimento radioativo, para o cálculo das taxas de contagens observadas pelas sondas, como se todos os valores tivessem sido obtidos no instante da injeção, ou seja, sem decaimento.

$$C_{t_0} = C_{t_{\text{det}}} e^{\frac{(0,693(t-t_0))}{T_{1/2}}} \quad (5.3)$$

onde,

$C_{t_0}$  = taxa de contagem (cps), no instante  $t_0$  da injeção;

$C_{t_{\text{det}}}$  = taxa de contagem (cps), no instante  $t_{\text{det}}$  da detecção;

$t-t_0$  = diferença entre os instantes da detecção e da injeção (seg);

$t_0$  = instante da injeção (seg);

$T$  = meia vida do traçador radioativo (seg).

### V.2.5 Correção da Eficiência das Sondas

Cada conjunto sonda-colimador apresenta uma eficiência de contagens, ou seja, para cada conjunto obtém-se um valor de taxa de contagens, quando colocado a uma distância conhecida, duma fonte de atividade unitária padrão de radioisótopo. Em geral, utiliza-se uma fonte de 1  $\mu\text{Ci}$  de  $\text{Cs}^{137}$ . A calibração é feita no campo, no momento do levantamento do ruído de fundo, e verificada diariamente, durante os trabalhos com traçadores radioativos. No Córrego Vinte e Um, foi utilizada a Sonda 5 como padrão, e os valores das outras sondas foram corrigidos, multiplicando-se os valores de suas taxas de contagem pelos fatores apresentados na **Tabela V.4**.

**Tabela V.4 – Fatores de correção da eficiência dos conjuntos sonda-colimador**

	Sonda 9	Sonda 5	Sonda 7
Fator de Correção	1,076	1,000	1,165

### V.2.6 Correção da Velocidade de deslocamento das Sondas

Cada detecção apresenta uma velocidade média ligeiramente diferente, que foi anotada nas memórias de campo. Como o Método do Balanço das Taxas de Contagem foi desenvolvido para uma velocidade de detecção unitária, igual a 1 m/s, os valores das taxas de contagem das sondas devem ser multiplicados pela velocidade de deslocamento do carro suporte das sondas, em cada detecção.

## V. 3 MÉTODO DO BALANÇO DAS TAXAS DE CONTAGEM

O método foi desenvolvido no Centro de Estudos Nucleares de Saclay do Commissariado de Energia Atômica da França, CENS/CEA, pelos pesquisadores engenheiros Guy Sauzay e Guy Courtois, e apresentado no ano 1966 (WILSON-JR., 2003), e desde então, tem sido utilizado em vários países, em ambientes fluvial, estuarino e marinho.

O método tem como finalidade a obtenção de dados qualitativos e quantitativos do movimento por arraste, com o uso de traçadores radioativos. Consiste

da imersão de uma quantidade de material radioativo, de propriedades semelhantes às do material da camada ativa do leito, e do levantamento (deteção) do transporte e dispersão deste material em função do tempo (WILSON-JR. *et al.*, 1980).

A descarga sólida do material de fundo é calculada pela equação:

$$Q_b = \rho'_s L V_s E \quad (5.4)$$

onde:

$Q_b$  = Descarga sólida por arraste (t/d),

$\rho'_s$  = Massa específica do sedimento submerso ( $t/m^3$ ),

L = Largura do transporte da nuvem radioativa (m),

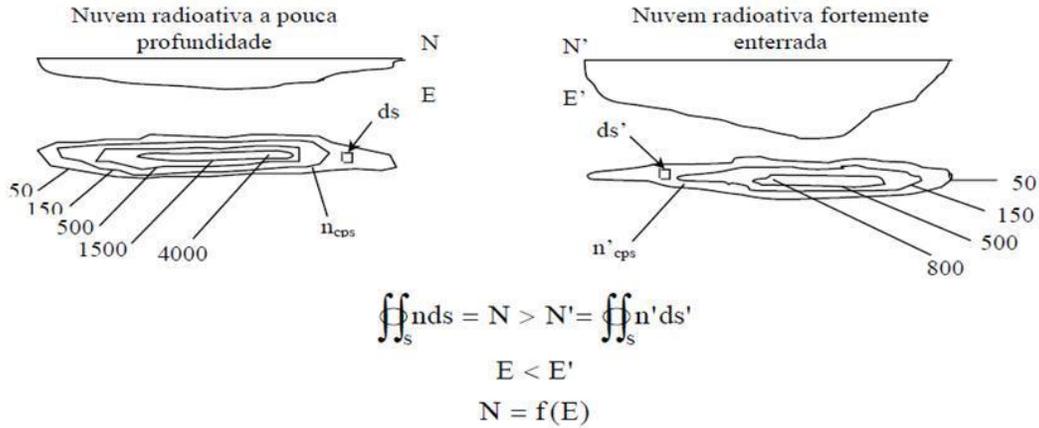
$V_s$  = Velocidade média do deslocamento da nuvem radioativa (m/d),

E = Espessura da camada do leito em movimento por arraste (m).

A massa específica do sedimento submerso,  $\rho'_s$ , é determinada em laboratório de sedimentologia e/ou geotécnica; a largura do transporte, L, é medida diretamente das curvas de isoatividade ou isocontagens, que são obtidas unindo-se os pontos de mesma contagem de uma deteção. A velocidade média  $V_s$  é calculada a partir do deslocamento do centro de gravidade da nuvem radioativa entre duas deteções consecutivas. Necessita-se ainda do conhecimento da espessura de transporte E. O Método do Balanço das Taxas de Contagem permite a sua determinação.

O método baseia-se num princípio bastante simples: quanto mais enterrado estiver o traçador, menor será o número de contagens registrado pelo detector, devido à absorção da radiação pela camada de sedimentos e a uma geometria de deteção desfavorável.

Consideram-se, por exemplo, que foram detectadas duas nuvens radioativas, contendo cada uma, a mesma atividade A, mas estando uma delas mais profundamente enterrada que a outra, como ilustrado na Figura V.5.



**Figura V.5 – Princípio do Método do Balanço das Taxas de Contagem (WILSON-JR. *et al.*, 1980)**

Quanto mais enterrado estiver o traçador, menor será o número de contagens acusadas por um detector, em consequência da maior absorção da radiação e de uma geometria de detecção menos favorável. Deve existir portanto, uma relação entre a espessura  $E$  da camada em movimento e o número total de contagens detectadas:

$$N = \iint_S n_s ds \quad (5.5)$$

Chama-se balanço das taxas de contagens ou recuperação, os cálculos de  $N$  e da espessura de transporte  $E$ , a partir das curvas de mesma atividade que caracterizam a evolução da massa do traçador. COURTOIS e SAUZAY (1966) mostraram que o número total de contagens detectadas,  $N$ , é uma função de  $E$ , expressa pela igualdade:

$$\frac{1}{\beta} \frac{\alpha}{f_0} \frac{N}{A} E = 1 - e^{-\alpha E} \quad (5.6)$$

onde:  $\beta$  é um coeficiente adimensional, representativo da forma de repartição do traçador em profundidade, e,  $\alpha$  e  $f_0$  são parâmetros característicos da aparelhagem utilizada e do tipo de sedimento que compõe o leito do escoamento. Definem a lei de resposta do sistema de detecção  $f(z)$  em função da profundidade  $z$ :

$$f = f_0 \cdot e^{-\alpha z} \quad (5.7)$$

A lei de resposta de um detector colimado  $f = f(z)$ , é definida como a lei de distribuição das taxas de contagem detectadas, para uma atividade unitária,

uniformemente distribuída numa superfície plana, centrada no detector, situada à profundidade  $z$  (NERY, 2002).

Os valores dos parâmetros  $\alpha$  e  $f_0$  são determinados em laboratório ou na natureza, e dependem do tipo de radioisótopo utilizado, da sonda de detecção, do material do leito, da geometria da detecção e dos colimadores de chumbo utilizados. Suas dimensões são:

$$[\alpha] = L^{-1} \text{ (inverso da unidade de comprimento)}$$

$[f_0] = [C] T^{-1}/[A] L^{-2}$  (taxa de contagens por unidade de atividade radioativa, por unidade de área).

A unidade de atividade utilizada até a década de oitenta foi o *Curie* (Ci), definido como sendo igual a  $3,7 \times 10^{10}$  desintegrações/segundo. Atualmente, a unidade de atividade utilizada é o *Becquerel* (Bq), que é igual a 1 desintegração por segundo. Tem-se então:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq} \quad (5.8)$$

Os valores determinados para os trabalhos no Córrego Vinte e Um estão apresentados na **Tabela V.5**.

**Tabela V.5 – Valores dos parâmetros  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $f_0$**

Injeção	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$\beta$ (adimensional)	$f_0$ ( $\text{cps} \times \text{cm}^2 \times \mu\text{Ci}$ )
1 <sup>era</sup> Injeção ( $\text{Au}^{198}$ )	0,156	1,15	830
2 <sup>da</sup> Injeção ( $\text{Au}^{198}$ )	0,156	1,15	1700
3 <sup>era</sup> Injeção ( $\text{Ir}^{192}$ )	0,171	1,15	4000

Os trabalhos efetuados no Córrego Vinte e Um permitiram calcular a descarga sólida pelo Método do Balanço das Taxas de Contagem.

Após as injeções do material radioativo, foram realizadas detecções das nuvens radioativas de material sólido, para determinação do transporte e da dispersão do grupo de partículas. Também foram coletadas amostras de sedimentos de fundo para a determinação das leis de distribuição do sedimento radioativo em profundidade.

No Capítulo VI, serão analisados os dados dos ensaios com traçadores radioativos, incluindo os procedimentos para a obtenção dos valores dos parâmetros da Equação do Balanço das Taxas de Contagem, e para o cálculo da descarga sólida por arraste do material do leito do Córrego Vinte e Um.

## CAPÍTULO VI

### RESULTADOS DOS ENSAIOS COM TRAÇADORES RADIOATIVOS E CÁLCULO DA DESCARGA SÓLIDA PELO MÉTODO DO BALANÇO DAS TAXAS DE CONTAGEM

Após as correções dos valores das contagens registradas durante as detecções de traçadores radioativos, são realizados os cálculos de estimativa da descarga sólida usando o Método do Balanço das Taxas de Contagem.

Determinam-se os valores da velocidade média do deslocamento; da largura da nuvem radioativa ou largura de transporte; e da espessura da camada ativa do leito. O valor da massa específica do sedimento submerso é feita em laboratórios de química, sedimentologia ou geotécnica.

A velocidade média do deslocamento dos radioisótopos é determinada através do cálculo das posições do centro de gravidade da nuvem radioativa, em função do tempo.

Para as determinações da largura do transporte são utilizadas as curvas de isocontagens, citadas no capítulo anterior, e a espessura de transporte ou da camada ativa do leito é determinada pelo Método do Balanço das Taxas de Contagem e pela medição direta de repartição de atividade em profundidade.

#### VI.1 CÁLCULO DO CENTRO DE GRAVIDADE DA NUVEM RADIOATIVA

Para a determinação da posição do centro de gravidade de uma detecção, calculam-se, em primeiro lugar, os valores das taxas de contagem  $n_i$ , em cps x m, nas seções transversais do escoamento. O valor  $n_i$  corresponde à taxa de contagem ou, de cintilações num dado corte transversal da nuvem radioativa, perpendicular à direção de transporte, conforme ilustrado na **Figura VI.1**.

Nesta figura o valor de  $n_i$  corresponde à área abaixo da curva representada pelos valores das contagens de cada sonda.

Uma vez conhecidos os valores de  $n_i$  de uma detecção, traça-se o gráfico destas em função da distância a uma seção de origem, neste caso a seção de injeção do material radioativo. O gráfico obtido corresponde ao diagrama de transporte, como exemplificado na **Figura VI.2**.

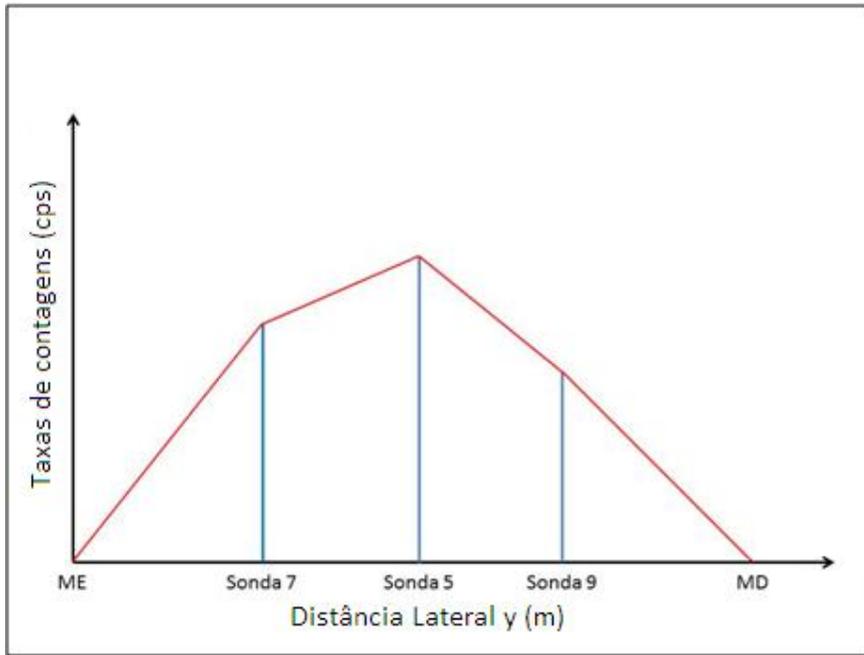


Figura VI.1 – Área transversal  $n_i$ , em cps x m

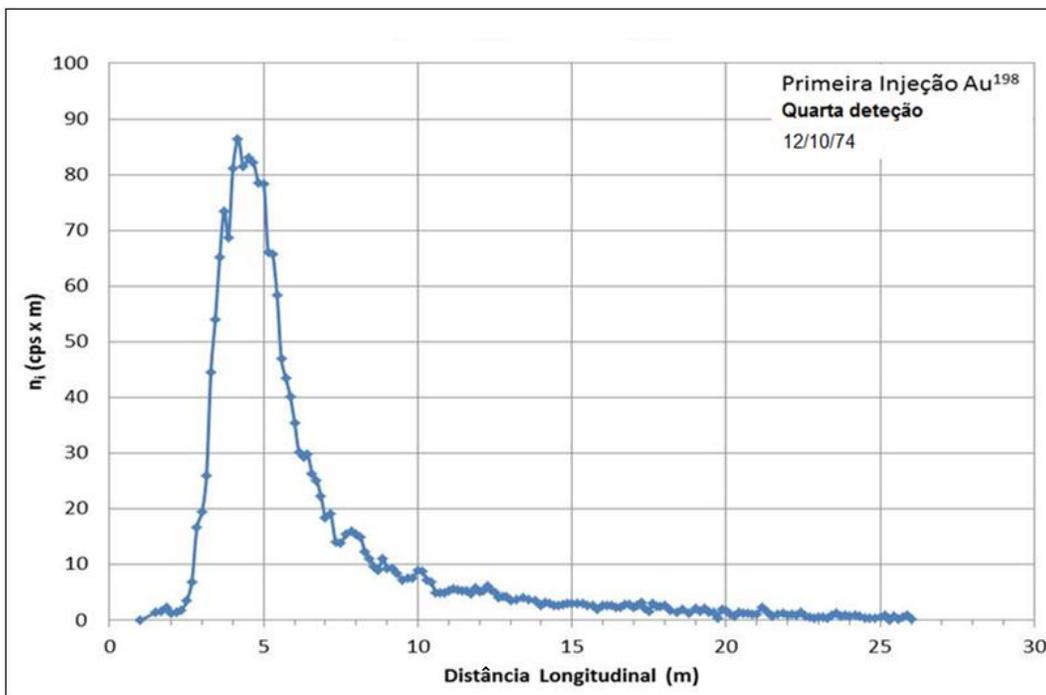


Figura VI.2 – Exemplo de diagrama de transporte

A área do diagrama de transporte,  $N$ , em cps x m<sup>2</sup>, corresponde ao número total de contagens detectadas, e é calculada pelo somatório:

$$N = \sum_{i=1}^p \frac{(A_i + A_{i+1})}{2} \Delta x_i \quad (6.1)$$

onde

$A_i$  = área  $n_i$  em cps x m da  $i$ -ésima seção transversal;

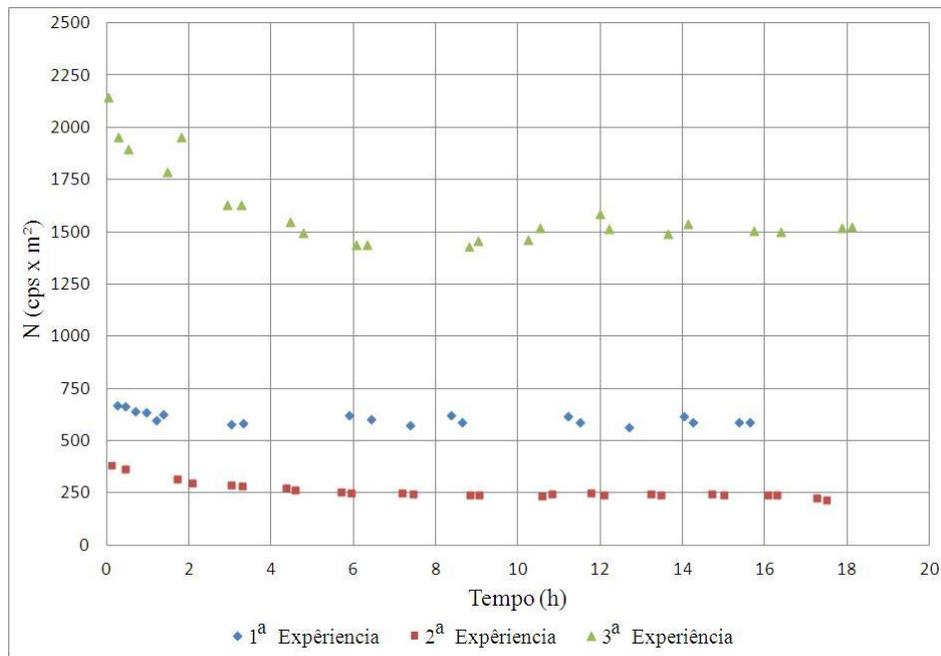
$A_{i+1}$  = área  $n_{i+1}$  em cps x m da seção transversal  $i+1$ ;

$p$  = número de seções transversais de áreas  $n_i$  que existem numa nuvem radioativa;

$\Delta x_i$  = distância entre duas seções transversais, em metros.

O procedimento torna-se mais exato à medida que o valor de  $\Delta x_i$  diminui. Como no caso das detecções tinha-se um mínimo de quatro contagens por metro percorrido pela sonda, o maior valor de  $\Delta x_i$  nos cálculos foi igual a 0,25 m.

O valor de  $N$  da detecção, varia com a espessura de transporte do material do leito ou da camada móvel. Na **Figura VI.3**, a seguir, apresentam-se os valores do número total de contagens,  $N_i$  em cps x m<sup>2</sup>, em função do tempo, para cada uma das experiências realizadas no Córrego Vinte e Um.

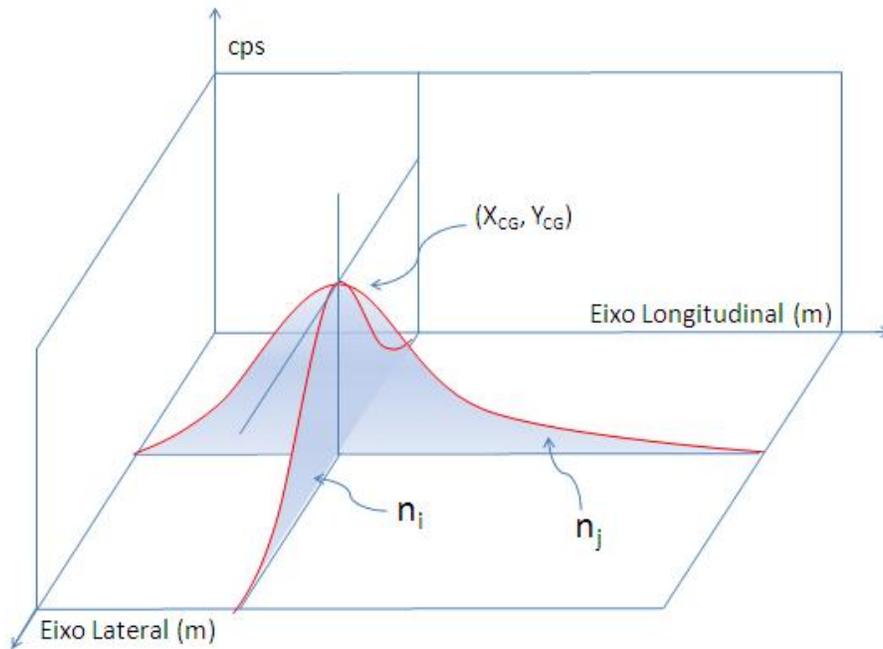


**Figura VI.3 – Número total de contagens  $N$  (cps x m<sup>2</sup>) em função do tempo**

A posição do Centro de Gravidade da nuvem de partículas de sedimentos radioativos, é um vetor cujos componentes longitudinal  $X_{CG}(t)$  e lateral  $Y_{CG}(t)$ , variam com o tempo.

Nos estudos realizados no Córrego Vinte e Um, as distâncias longitudinal e lateral foram medidas a partir da seção transversal situada 1 m a montante da seção de injeção, e a partir do trilho de madeira instalado ao longo da margem esquerda do curso d'água, respectivamente. Os sentidos considerados positivos das medidas foram o do escoamento, para as distâncias longitudinais e da margem esquerda para a direita para as distâncias laterais.

Na **Figura VI.4**, apresenta-se o esquema básico para determinação do centro de gravidade da nuvem radioativa, para um dado instante t, ou seja, para uma dada detecção.



**Figura VI.4 – Esquema de determinação do Centro de Gravidade**

Para determinação do valor da coordenada longitudinal do centro de gravidade num instante t, ou seja, para uma detecção, foi utilizada a seguinte expressão:

$$X_{CG}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{\ell} n_i(t) x_i \Delta x}{\sum_{i=1}^{\ell} n_i(t) \Delta x} = \frac{\sum_{i=1}^{\ell} n_i(t) x_i \Delta x}{N(t)} \quad (6.2)$$

sendo,  $\ell$  o comprimento longitudinal da nuvem radioativa, onde a variável  $x_i$  corresponde à posição longitudinal da  $i$ -ésima seção transversal, e  $n_i(t)$  a contagem total, em cps x m obtida nessa seção nesse instante.

Da mesma forma pode-se calcular o valor da coordenada transversal do centro de gravidade, num instante determinado, utilizando-se a expressão:

$$Y_{CG}(t) = \frac{\sum_{j=1}^L n_j(t) y_j \Delta y}{\sum_{j=1}^L n_j(t) \Delta y} = \frac{\sum_{j=1}^L n_j(t) y_j \Delta y}{N(t)} \quad (6.3)$$

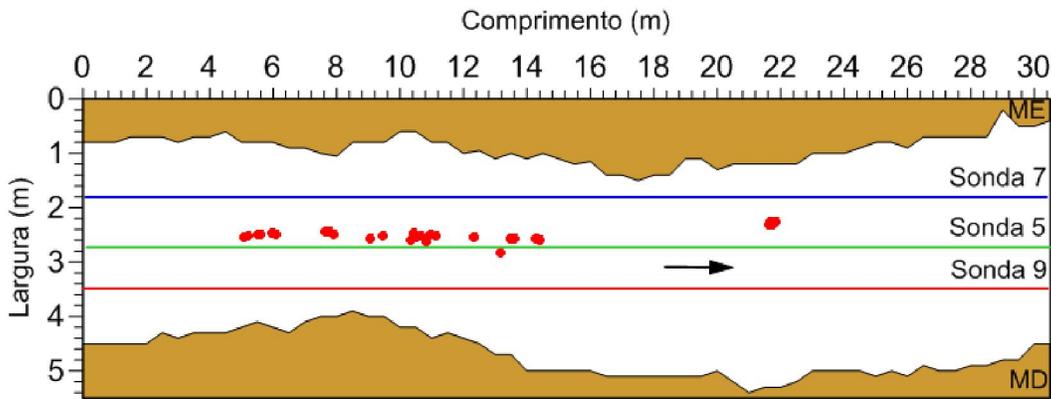
onde:

$n_j$  = taxa de contagem total correspondente à posição lateral  $j$ ;

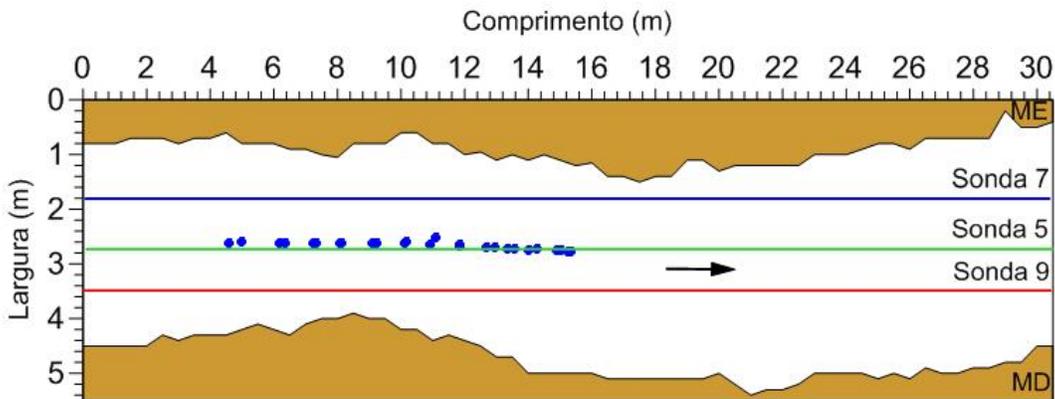
$j$  = posição lateral, na seção transversal da nuvem radioativa;

$y_j$  = distância lateral da taxa de contagem  $n_j$ , a partir do trilho de madeira.

Esses cálculos, tanto na forma longitudinal quanto lateral, foram realizados para cada detecção, e para as três injeções realizadas no Córrego Vinte e Um, obtendo-se assim, os valores das coordenadas dos centros de gravidade de cada detecção. Nas **Figuras VI.5 a VI.7**, apresentam-se as evoluções no tempo, das posições do centro de gravidade das partículas radioativas, para cada injeção.



**Figura VI.5 – Variação da posição do centro de gravidade na primeira experiência, com  $Au^{198}$**



**Figura VI.6 – Variação da posição do centro de gravidade na segunda experiência, com  $Au^{198}$**

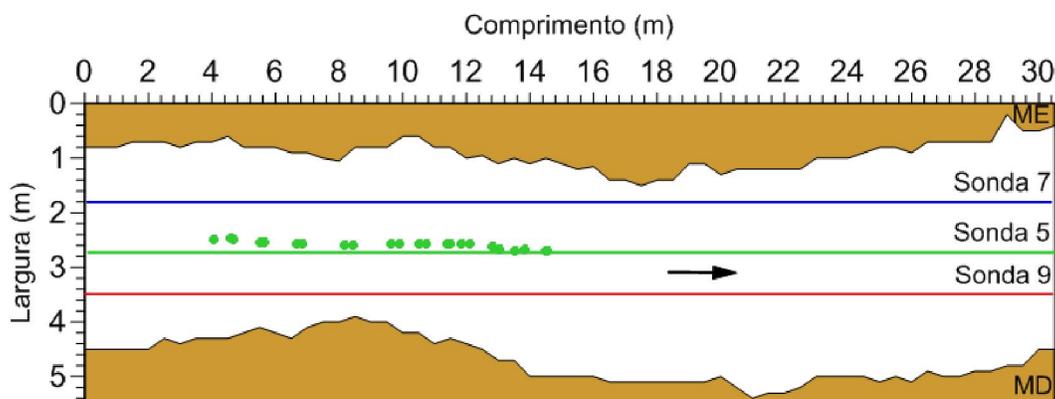


Figura VI.7 – Variação da posição do centro de gravidade na terceira experiência, com Ir<sup>192</sup>

Nas Tabelas VI.1 a VI.3 estão apresentados os valores das coordenadas longitudinal e lateral das posições do centro de gravidade da nuvem radioativa, para cada detecção.

Tabela VI.1 – Coordenadas do centro de gravidade – Primeira Injeção Au<sup>198</sup>

Detecção			N	Centro de Gravidade	
Número	Tempo (h:min)	Tempo (h)	cps x m <sup>2</sup>	X <sub>CG</sub> (m)	Y <sub>CG</sub> (m)
1	00:16	0,27	667,58	5,09	2,53
2	00:27	0,45	665,27	5,19	2,52
3	00:42	0,70	639,63	5,51	2,50
4	00:58	0,97	635,75	5,62	2,50
5	01:12	1,20	597,97	6,09	2,50
6	01:23	1,38	628,92	5,95	2,47
9	03:02	3,03	581,53	7,64	2,44
10	03:19	3,32	583,13	7,75	2,44
14	05:54	5,90	624,10	10,65	2,51
15	06:25	6,42	601,39	10,52	2,54
16	07:22	7,37	576,29	10,42	2,47
17	08:22	8,37	621,17	10,98	2,49
18	08:38	8,63	590,56	11,14	2,51
19	11:12	11,20	615,20	12,32	2,53
20	11:30	11,50	587,39	12,35	2,54
21	12:41	12,68	565,48	13,15	2,82
23	14:01	14,02	616,66	13,47	2,57
24	14:15	14,25	591,18	13,46	2,57
25	15:22	15,37	587,09	13,63	2,57
26	15:38	15,63	590,71	14,41	2,60
27	46:15	46,25	290,94	21,67	2,27
28	46:28	46,47	301,81	21,84	2,25
29	51:09	51,15	291,20	21,63	2,32
30	51:14	51,23	293,35	21,76	2,31

**Tabela VI.2 – Coordenadas do centro de gravidade – Segunda Injeção Au<sup>198</sup>**

Deteção			N	Centro de Gravidade	
Número	Tempo (h:min)	Tempo (h)	cps x m <sup>2</sup>	X <sub>CG</sub> (m)	Y <sub>CG</sub> (m)
1	00:07	0,12	382,57	4,58	2,62
2	00:27	0,45	366,66	4,98	2,60
3	01:42	1,70	316,93	6,18	2,62
4	02:04	2,07	300,72	6,34	2,61
5	03:01	3,02	288,96	7,25	2,63
6	03:17	3,28	284,38	7,34	2,61
7	04:22	4,37	273,61	8,12	2,63
8	04:35	4,58	266,79	8,07	2,61
9	05:42	5,70	256,99	9,09	2,62
10	05:56	5,93	250,41	9,25	2,61
11	07:11	7,18	252,48	10,13	2,62
12	07:26	7,43	246,99	10,18	2,60
13	08:50	8,83	242,12	10,91	2,64
14	09:02	9,03	242,01	11,09	2,51
15	10:35	10,58	237,42	11,83	2,67
16	10:49	10,82	244,54	11,84	2,66
17	11:46	11,77	249,81	12,66	2,69
18	12:04	12,07	242,99	12,95	2,69
19	13:13	13,22	247,06	13,36	2,72
20	13:27	13,45	241,91	13,57	2,72
21	14:42	14,70	247,53	14,03	2,74
22	14:59	14,98	242,24	14,26	2,74
23	16:04	16,07	240,83	14,88	2,76
24	16:17	16,28	240,32	15,04	2,76
25	17:15	17,25	225,52	15,23	2,77
26	17:29	17,48	216,45	15,33	2,79

**Tabela VI.3 – Coordenadas do centro de gravidade – Terceira Injeção Ir<sup>192</sup>**

Deteção			N	Centro de Gravidade	
Número	Tempo (h:min)	Tempo (h)	cps x m <sup>2</sup>	X <sub>CG</sub> (m)	Y <sub>CG</sub> (m)
1	00:03	0,05	2144,95	4,06	2,49
2	00:17	0,28	1957,79	4,60	2,48
3	00:32	0,53	1898,77	4,66	2,49
4	01:28	1,47	1788,26	5,64	2,55
5	01:49	1,82	1954,80	5,51	2,54
6	02:55	2,92	1629,63	6,66	2,58
7	03:16	3,27	1630,56	6,86	2,58
8	04:27	4,45	1550,46	8,15	2,60
9	04:47	4,78	1498,70	8,42	2,59
10	06:03	6,05	1442,18	9,64	2,56
11	06:19	6,32	1439,26	9,91	2,57
12	08:48	8,80	1432,13	10,53	2,57
13	09:02	9,03	1459,10	10,74	2,58
14	10:14	10,23	1463,76	11,40	2,56
15	10:32	10,53	1524,11	11,47	2,57
16	11:59	11,98	1589,40	11,82	2,58
17	12:13	12,22	1515,96	12,11	2,57
18	13:39	13,65	1495,43	12,81	2,63
19	14:08	14,13	1542,75	13,04	2,66
20	15:43	15,72	1505,28	13,51	2,69
21	16:23	16,38	1501,25	13,82	2,68
22	17:52	17,87	1522,05	14,48	2,71
23	18:06	18,10	1528,47	14,55	2,70

## VI.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS POSIÇÕES DAS PARTÍCULAS

### VI.2.1 Valor Médio das Posições das Partículas

Os valores médios das posições dos grãos de sedimentos numa deteção corresponde aos valores das coordenadas longitudinal e lateral,  $X_{CG}(t)$  e  $Y_{CG}(t)$ , do centro de gravidade da deteção.

Esses valores foram calculados pelas Equações 6.2 e 6.3, e apresentados nas Figuras VI.5 a VI.7, e Tabelas VI.1 a VI.3, precedentes. Eles serão utilizados para o cálculo, entre outros, da velocidade de transporte das nuvens de sedimentos radioativos.

### VI.2.2 Variâncias das Posições das Partículas

A variância das posições das partículas é uma estimativa da dispersão dos grãos de sedimentos em torno de sua posição média, ou seja, em torno da posição do seu centro de gravidade. Para determinar a variância foram usadas as seguintes expressões:

$$S_x^2 = \frac{\sum_{x=0}^{\ell} x_i^2 n_i(t) \Delta x}{\sum_{x=0}^{\ell} n_i(t) \Delta x} - [X_{CG}(t)]^2 \quad (6.4)$$

$$S_y^2 = \frac{\sum_{y=0}^L y_i^2 n_i(t) \Delta y}{\sum_{y=0}^L n_i(t) \Delta y} - [Y_{CG}(t)]^2 \quad (6.5)$$

Nas **Tabelas VI.4a VI.6**, a seguir, estão apresentados os valores da média, variância e moda das posições longitudinais e laterais dos grãos de sedimentos radioativos, para cada injeção realizada no Córrego Vinte e Um.

**Tabela VI.4 – Valores Estatísticos da Posição das Partículas Radioativas, Marcadas com Au<sup>198</sup>. Primeira Experiência**

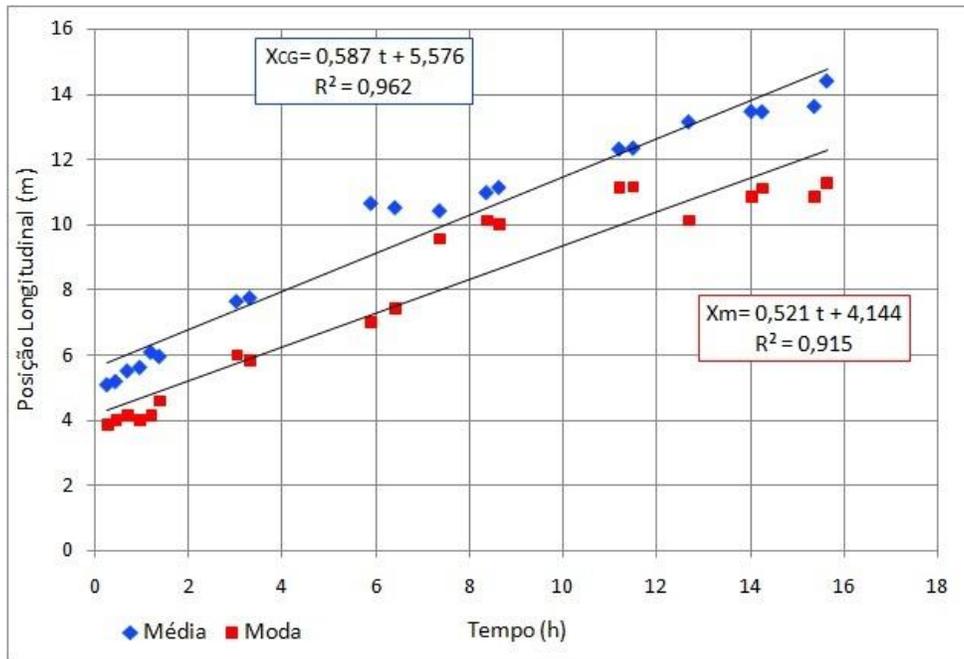
Detecção		N cps x m <sup>2</sup>	Centro de Gravidade		Variância		Moda	
Número	Tempo (h)		X <sub>CG</sub> (m)	Y <sub>CG</sub> (m)	S <sub>x</sub> <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	S <sub>y</sub> <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	x(m)	y(m)
1	0,27	667,58	5,09	2,53	12,45	0,362	3,86	2,76
2	0,45	665,27	5,19	2,52	13,46	0,359	4,00	2,76
3	0,70	639,63	5,51	2,50	13,25	0,364	4,14	2,76
4	0,97	635,75	5,62	2,50	15,88	0,361	4,00	2,76
5	1,20	597,97	6,09	2,50	13,21	0,375	4,14	2,76
6	1,38	628,92	5,95	2,47	16,91	0,351	4,60	2,76
9	3,03	581,53	7,64	2,44	17,99	0,379	6,00	2,76
10	3,32	583,13	7,75	2,44	19,74	0,379	5,83	2,76
14	5,90	624,10	10,65	2,51	48,90	0,441	7,00	2,76
15	6,42	601,39	10,52	2,54	36,40	0,446	7,43	2,76
16	7,37	576,29	10,42	2,47	31,71	0,427	9,57	1,80
17	8,37	621,17	10,98	2,49	36,08	0,446	10,14	1,80
18	8,63	590,56	11,14	2,51	40,81	0,445	10,00	1,80
19	11,20	615,20	12,32	2,53	37,19	0,457	11,14	1,80
20	11,50	587,39	12,35	2,54	40,33	0,455	11,17	1,80
21	12,68	565,48	13,15	2,82	39,58	0,421	10,14	3,42
23	14,02	616,66	13,47	2,57	45,04	0,461	10,86	1,80
24	14,25	591,18	13,46	2,57	48,26	0,453	11,12	1,80
25	15,37	587,09	13,63	2,57	47,32	0,453	10,86	1,80
26	15,63	590,71	14,41	2,60	40,04	0,452	11,29	1,80
27	46,25	290,94	21,67	2,27	61,02	0,323	25,86	1,80
28	46,28	301,81	21,84	2,25	58,95	0,301	25,67	1,80
29	51,09	291,20	21,63	2,32	76,06	0,369	27,00	1,80
30	51,14	293,35	21,76	2,31	69,96	0,358	27,71	1,80

**Tabela VI.5 – Valores Estatísticos da Posição das Partículas Radioativas, Marcadas com Au<sup>198</sup>. Segunda Experiência**

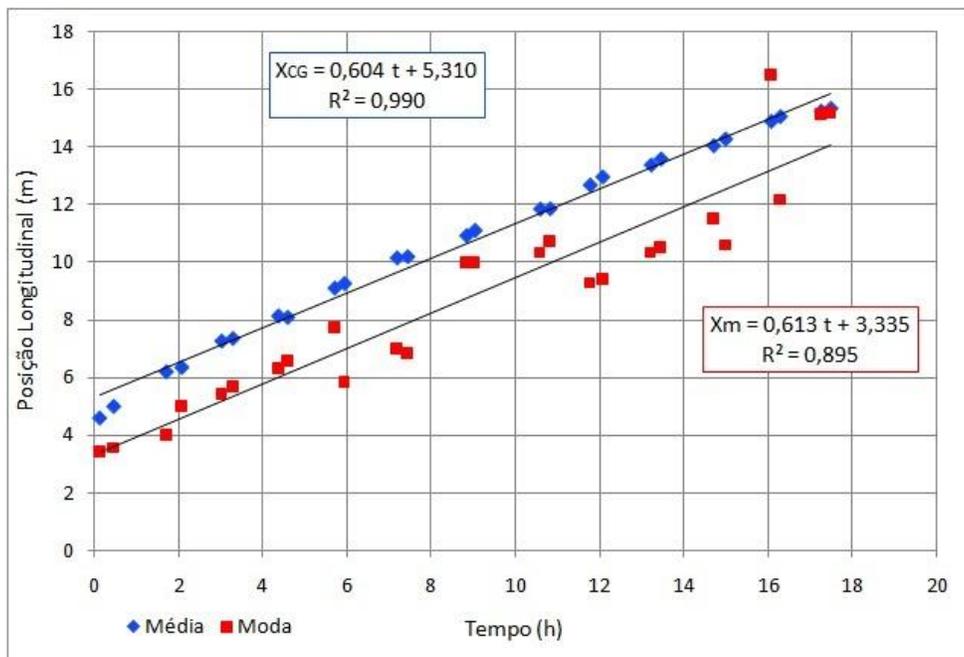
Detecção		N	Média		Variância		Moda	
Número	Tempo (h)		X <sub>CG</sub> (m)	Y <sub>CG</sub> (m)	S <sub>x</sub> <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	S <sub>y</sub> <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	x(m)	y(m)
1	0,12	382,57	4,58	2,62	11,09	0,407	3,43	2,76
2	0,45	366,66	4,98	2,60	12,36	0,409	3,57	2,76
3	1,70	316,93	6,18	2,62	17,00	0,404	4,00	2,76
4	2,07	300,72	6,34	2,61	16,45	0,404	5,00	2,76
5	3,02	288,96	7,25	2,63	17,93	0,401	5,43	2,76
6	3,28	284,38	7,34	2,61	19,24	0,400	5,71	2,76
7	4,37	273,61	8,12	2,63	21,52	0,403	6,33	2,76
8	4,58	266,79	8,07	2,61	25,51	0,397	6,57	2,76
9	5,70	256,99	9,09	2,62	22,85	0,418	7,75	2,76
10	5,93	250,41	9,25	2,61	24,90	0,417	5,86	1,80
11	7,18	252,48	10,13	2,62	25,45	0,419	7,00	1,80
12	7,43	246,99	10,18	2,60	25,80	0,417	6,86	1,80
13	8,83	242,12	10,91	2,64	27,73	0,420	10,00	1,80
14	9,03	242,01	11,09	2,51	27,52	0,422	10,00	1,80
15	10,58	237,42	11,83	2,67	28,17	0,423	10,33	1,80
16	10,82	244,54	11,84	2,66	28,77	0,424	10,71	1,80
17	11,77	249,81	12,66	2,69	34,67	0,425	9,28	1,80
18	12,07	242,99	12,95	2,69	33,67	0,422	9,43	1,80
19	13,22	247,06	13,36	2,72	38,98	0,415	10,33	1,80
20	13,45	241,91	13,57	2,72	35,67	0,416	10,50	1,80
21	14,70	247,53	14,03	2,74	36,68	0,408	11,50	1,80
22	14,98	242,24	14,26	2,74	37,02	0,411	10,60	1,80
23	16,07	240,83	14,88	2,76	39,91	0,406	16,50	2,76
24	16,28	240,32	15,04	2,76	38,07	0,404	12,17	1,80
25	17,25	225,52	15,23	2,77	39,91	0,410	15,14	3,42
26	17,48	216,45	15,33	2,79	38,11	0,414	15,17	3,42

**Tabela VI.6 – Valores Estatísticos da Posição das Partículas Radioativas, Marcadas com Ir<sup>192</sup>. Terceira Experiência**

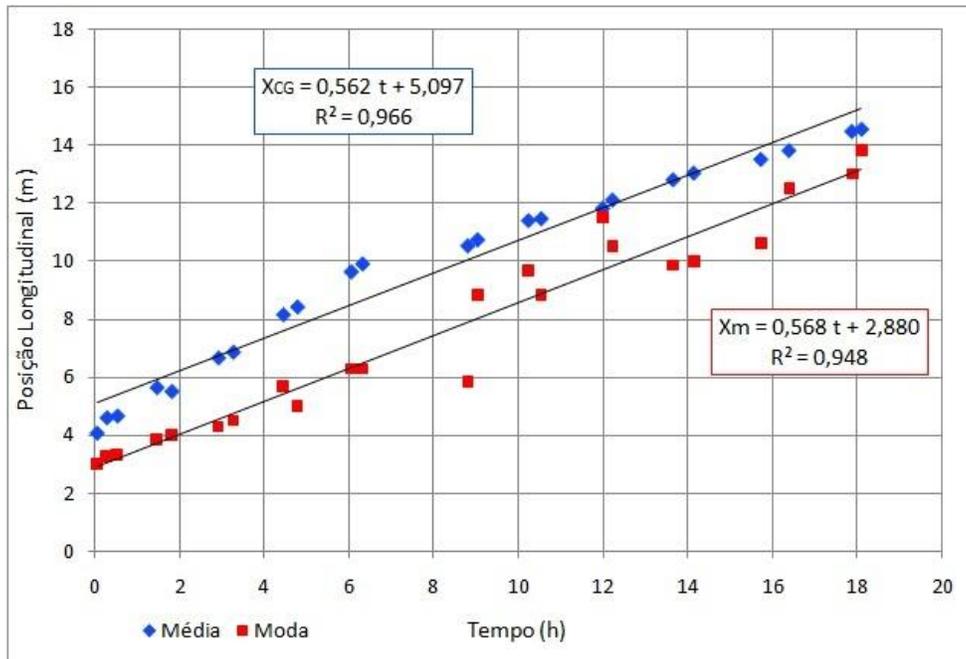
Detecção		N	Média		Variância		Moda	
Número	Tempo (h)		X <sub>CG</sub> (m)	Y <sub>CG</sub> (m)	S <sub>x</sub> <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	S <sub>y</sub> <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	x(m)	y(m)
1	0,05	2144,95	4,06	2,49	9,75	0,358	3,00	2,76
2	0,28	1957,79	4,60	2,48	10,85	0,353	3,28	2,76
3	0,53	1898,77	4,66	2,49	12,93	0,353	3,33	2,76
4	1,47	1788,26	5,64	2,55	16,49	0,377	3,86	2,76
5	1,82	1954,80	5,51	2,54	17,87	0,374	4,00	2,76
6	2,92	1629,63	6,66	2,58	21,75	0,394	4,29	2,76
7	3,27	1630,56	6,86	2,58	22,71	0,389	4,50	2,76
8	4,45	1550,46	8,15	2,60	33,64	0,404	5,67	2,76
9	4,78	1498,70	8,42	2,59	34,43	0,411	5,00	1,80
10	6,05	1442,18	9,64	2,56	39,33	0,414	6,29	1,80
11	6,32	1439,26	9,91	2,57	37,08	0,411	6,29	1,80
12	8,80	1432,13	10,53	2,57	38,19	0,416	5,83	2,76
13	9,03	1459,10	10,74	2,58	37,41	0,410	8,85	2,76
14	10,23	1463,76	11,40	2,56	36,58	0,428	9,67	1,80
15	10,53	1524,11	11,47	2,57	35,51	0,416	8,83	2,76
16	11,98	1589,40	11,82	2,58	36,63	0,426	11,50	2,76
17	12,22	1515,96	12,11	2,57	36,33	0,441	10,50	2,76
18	13,65	1495,43	12,81	2,63	37,37	0,455	9,86	1,80
19	14,13	1542,75	13,04	2,66	35,37	0,420	10,00	1,80
20	15,72	1505,28	13,51	2,69	32,14	0,409	10,62	1,80
21	16,38	1501,25	13,82	2,68	33,86	0,398	12,50	2,76
22	17,87	1522,05	14,48	2,71	33,02	0,385	13,00	2,76
23	18,10	1528,47	14,55	2,70	33,60	0,397	13,83	2,76



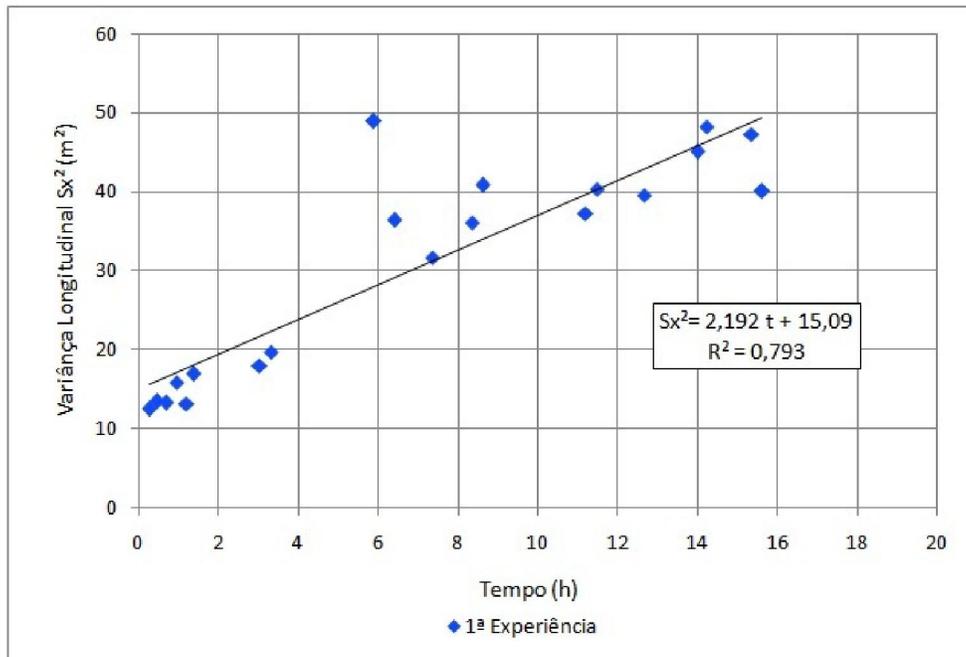
**Figura VI.8 – Variação temporal da posição longitudinal da média e moda da nuvem radioativa, 1ª Experiência**



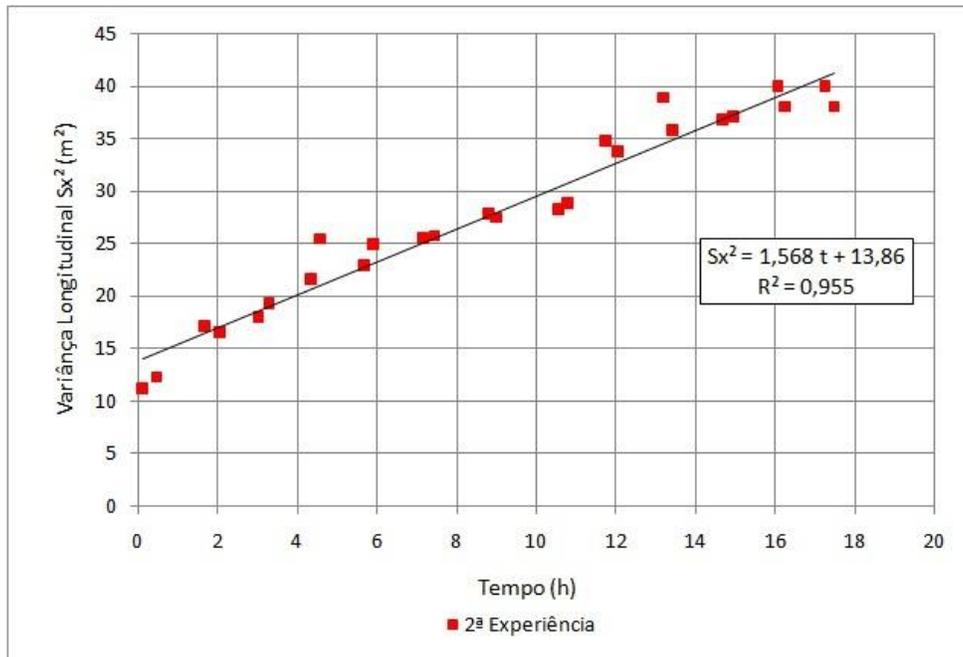
**Figura VI.9 – Variação temporal da posição longitudinal da média e moda da nuvem radioativa, 2ª Experiência**



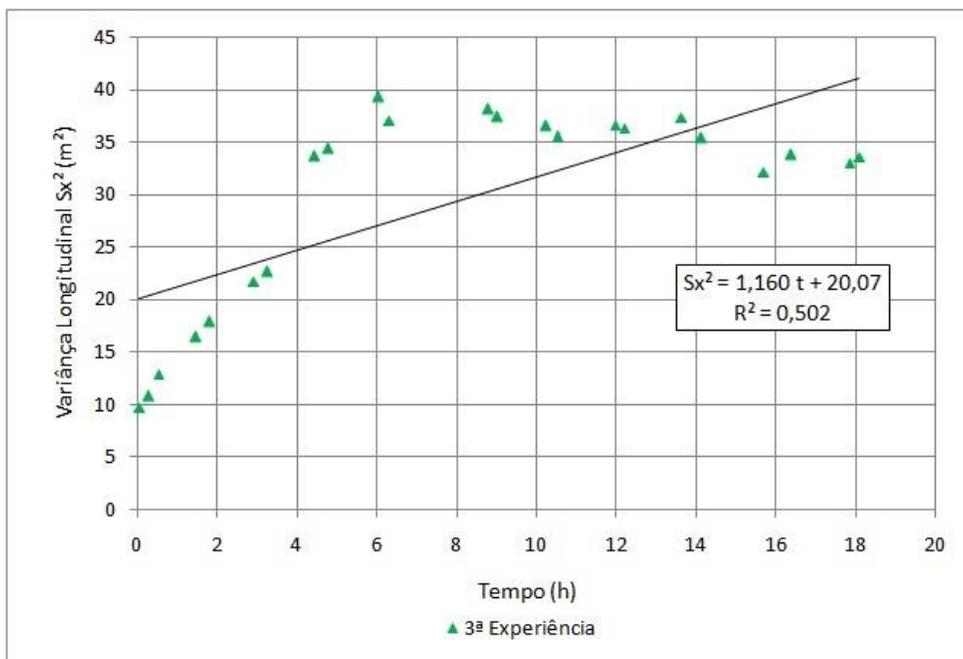
**Figura VI.10 – Variação temporal da posição longitudinal da média e moda da nuvem radioativa, 3ª Experiência**



**Figura VI.11 – Variação temporal da variância das posições longitudinais das partículas, 1ª Experiência**



**Figura VI.12 – Variação temporal da variância das posições longitudinais das partículas, 2ª Experiência**



**Figura VI.13 – Variação temporal da variância das posições longitudinais das partículas, 3ª Experiência**

De forma geral pode-se notar que os valores das modas foram sempre menores que os valores das posições do centro de gravidade, para cada detecção, o que quer dizer que o pico da taxa de contagens se localizou a montante da posição do centro de

gravidade, na nuvem radioativa. Nas **Figuras VI.8 a VI.10** apresentaram-se as variações temporais das posições das médias e das modas dos centros de gravidade da nuvem de partículas.

A variância indica o grau de espalhamento da nuvem radioativa. Nota-se, nas **Tabelas VI.4 a VI.6 e Figuras VI.11 a VI.13**, que a tendência nas três injeções corresponde ao aumento da dispersão longitudinal, em função do tempo; apresentando um declínio nas últimas detecções para cada injeção, devido ao avanço da nuvem radioativa além do domínio de monitoramento. No sentido lateral, percebe-se que os valores apresentam menor variação, tendo valores inferiores nas primeiras e últimas detecções.

### **VI.3 VELOCIDADE MÉDIA DE TRANSPORTE POR ARRASTE DE SEDIMENTOS DO CÓRREGO VINTE E UM**

A velocidade do transporte foi calculada através das **Figuras VI.8 a VI.10**, das evoluções das posições médias (centros de gravidade) das partículas radioativas em função do tempo. Os valores obtidos para as componentes da velocidade, segundo os eixos longitudinal e lateral, assim como da velocidade resultante, estão apresentados na **Tabela VI.7**.

**Tabela VI.7 – Velocidade média do centro de gravidade da nuvem radioativa**

	<b>1ª Injeção (Au<sup>198</sup>)</b>	<b>2ª Injeção (Au<sup>198</sup>)</b>	<b>3ª Injeção (Ir<sup>192</sup>)</b>
Velocidade Vx (m/d)	17,016	14,877	16,713
Velocidade Vy (m/d)	1,519	1,322	0,666
Velocidade resultante Vs (m/d)	17,084	14,936	16,726

### **VI.4 TRAÇADO OU DESENHO DAS CURVAS DE ISOCONTAGENS**

As curvas de isocontagens correspondem à representação gráfica dos valores de mesma taxa de contagens, obtidos em cada detecção da nuvem radioativa. Estes valores, registrados após as correções mencionadas no capítulo anterior, permitem visualizar a nuvem radioativa para cada detecção, ou seja, em tempos fixados após a injeção.

O valor da largura de transporte L pode ser diretamente determinado dos desenhos das curvas de isocontagens. Nas **Figuras VI.14a VI.17**, a seguir, apresentam-se as curvas de isocontagens obtidas da 1ª, 10ª, 20ª e 30ª detecções da primeira experiência realizada com traçadores radioativos no Córrego Vinte e Um.

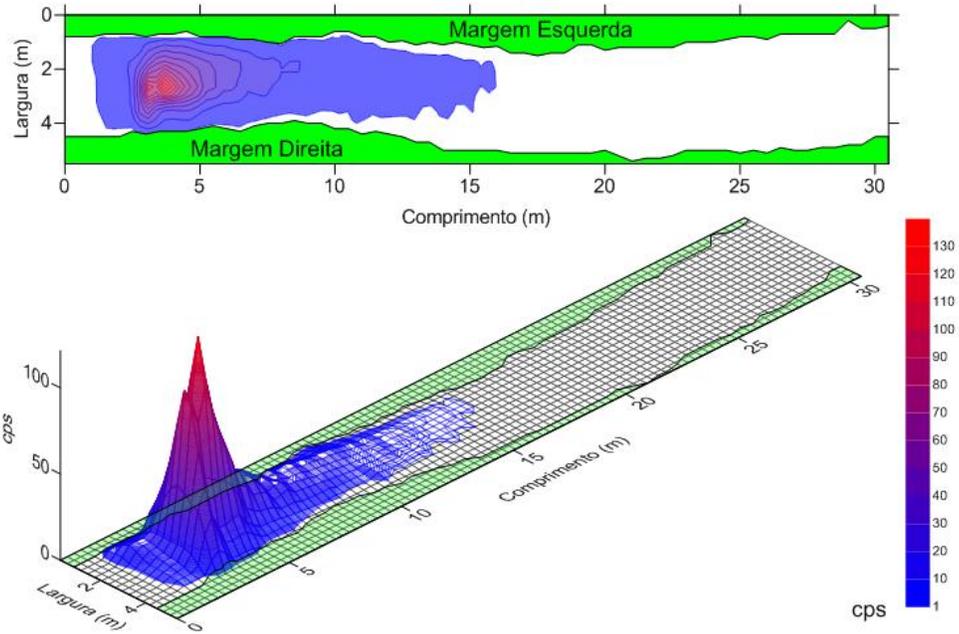


Figura VI.14 – Curvas de isocontagens da primeira detecção – primeira experiência com  $Au^{198}$

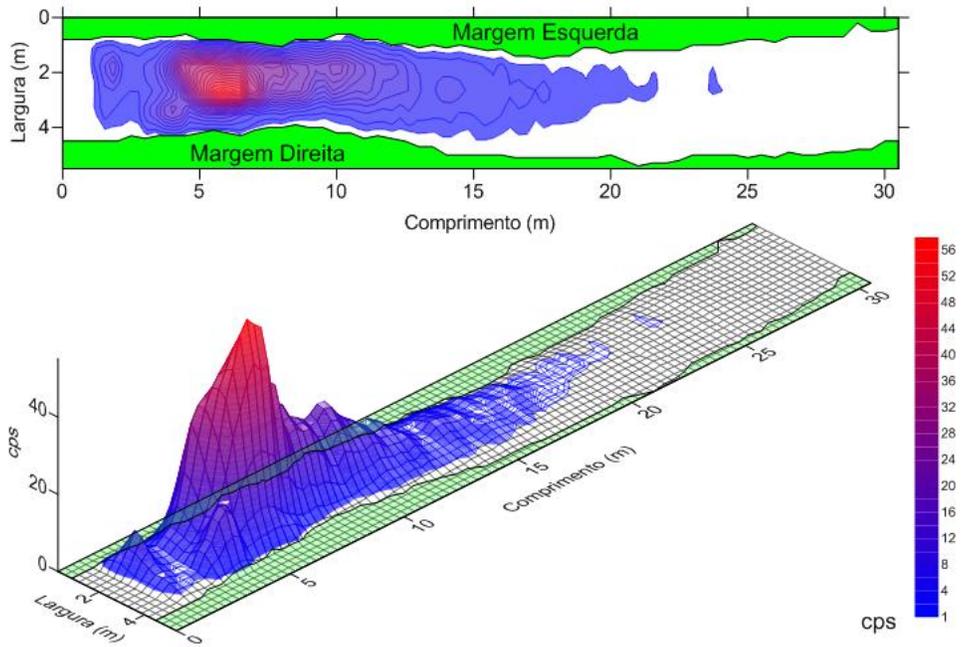


Figura VI.15 – Curvas de isocontagens da décima detecção – primeira experiência com  $Au^{198}$

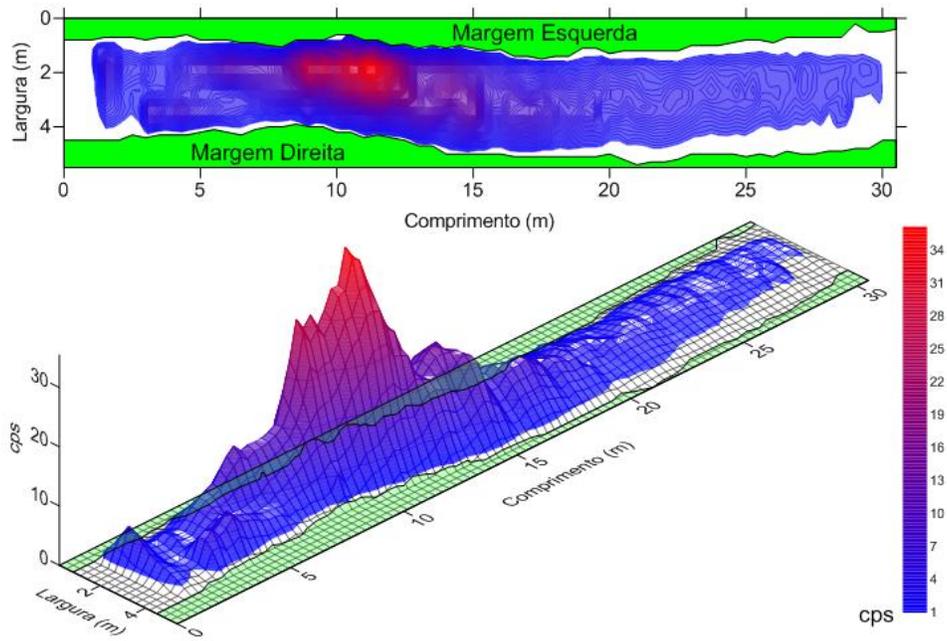


Figura VI.16 – Curvas de isocontagens da vigésima detecção – primeira experiência com  $Au^{198}$

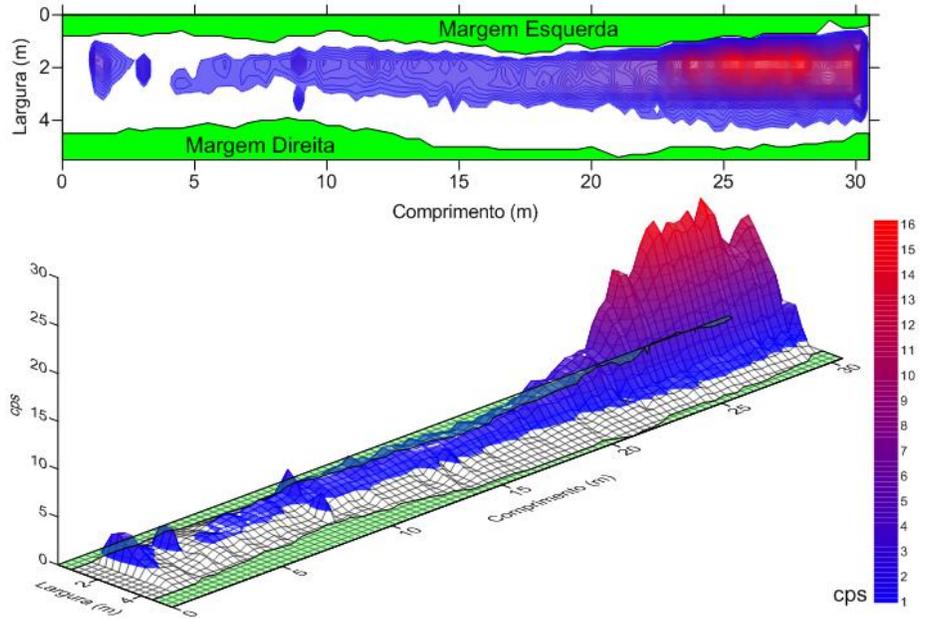


Figura VI.17 – Curvas de isocontagens da trigésima detecção – primeira experiência com  $Au^{198}$

Além de apresentarem uma imagem precisa do comportamento dos sedimentos radioativos, com destaque para as regiões de acumulação e erosão de

sedimentos, as curvas de isocontagem, definem diretamente os valores da largura de transporte.

Para a aplicação do Método do Balanço das Taxas de Contagem e cálculo da descarga sólida por arraste, foram utilizados os valores da largura da nuvem radioativa na seção transversal correspondente ao centro de gravidade da nuvem radioativa, em cada detecção.

As 24 curvas de isocontagens da primeira experiência com  $Au^{198}$ , as 26 curvas da segunda experiência com  $Au^{198}$ , assim como as 23 da terceira experiência com  $Ir^{192}$ , estão salvas nos arquivos 1°Injeção.srf, 2°Injeção.srf e 3°Injeção.srf, que se encontram no CD-ROM anexo na dissertação.

## **VI.5 ESPESSURA DE TRANSPORTE POR ARRASTE**

### **VI.5.1 Medição Direta**

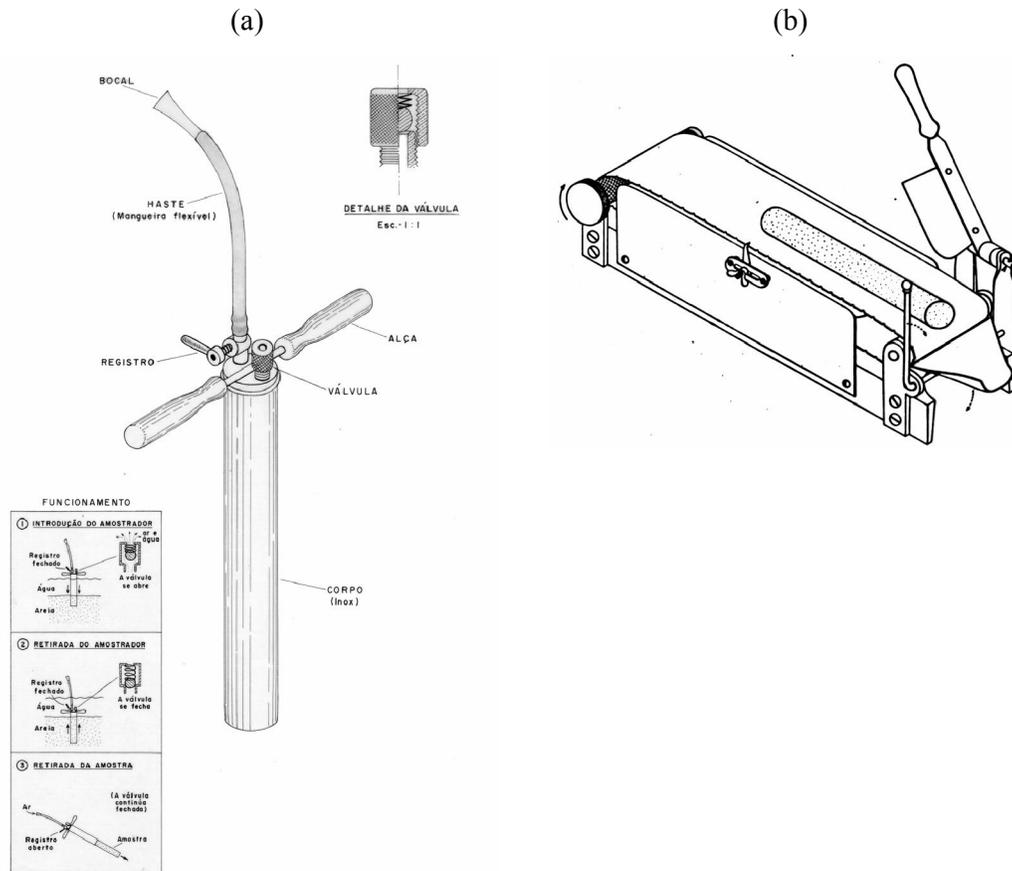
A determinação da espessura  $E$  do transporte por arraste foi realizada pelo Método do Balanço das Taxas de Contagem, tal como se expôs no item V.5 e utilizando-se a Equação 5.6. Para a utilização desta equação é preciso conhecer as leis de distribuição dos traçadores em profundidade. Estas leis de distribuição serão determinadas mediante a amostragem e determinação da atividade dos traçadores em profundidade.

Como já se mencionou, foram realizadas três experiências com traçadores radioativos no Córrego Vinte e Um, as duas primeiras com  $Au^{198}$  e a terceira com  $Ir^{192}$ . Devido à maior meia-vida do Irídio, a utilização deste radioisótopo permitiu realizar amostragem e determinações da distribuição de atividade em profundidade, *in-situ* e posteriormente, com maior precisão, no Instituto de Pesquisas Radioativas em Belo Horizonte, MG.

Assim, após as detecções da terceira experiência, foram coletadas amostras indeformadas de material do leito, em 30 seções transversais, com espaçamento de 1,0 m entre elas, nos três eixos longitudinais percorridos pelas sondas de detecção, num total de 90 amostras.

Para a amostragem foi utilizado um aparelho projetado para extrair uma coluna de 10 a 20 cm de sedimento em cada ponto da amostragem. Esta coluna foi cortada em pastilhas de 1 cm de espessura, cujas atividades foram determinadas *in-situ*, e em seguida foram enviadas para o IPR em Belo Horizonte, para determinações mais

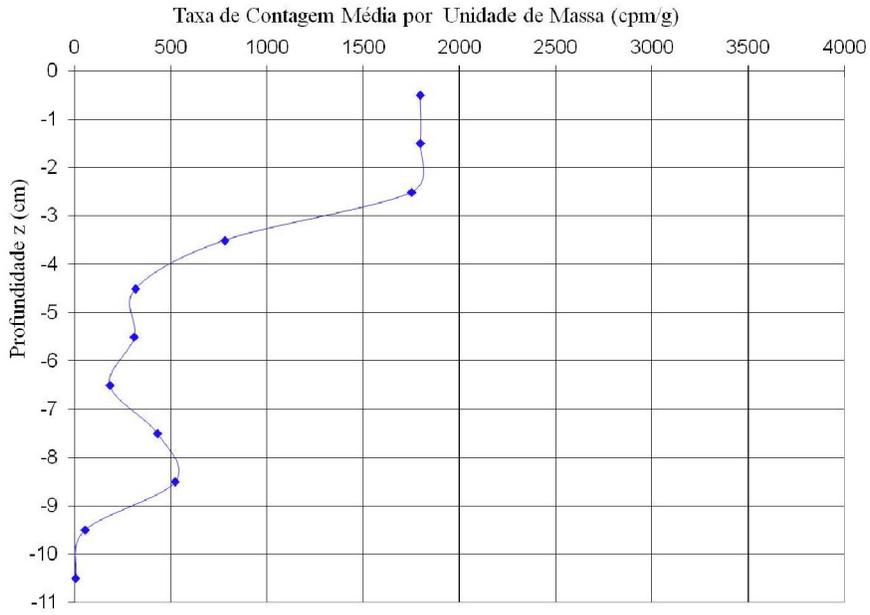
precisas, em laboratório. Na **Figura VI.18** apresenta-se o aparelho amostrador de sedimentos em profundidade e o aparelho utilizado para cortar as pastilhas de sedimento, respectivamente.



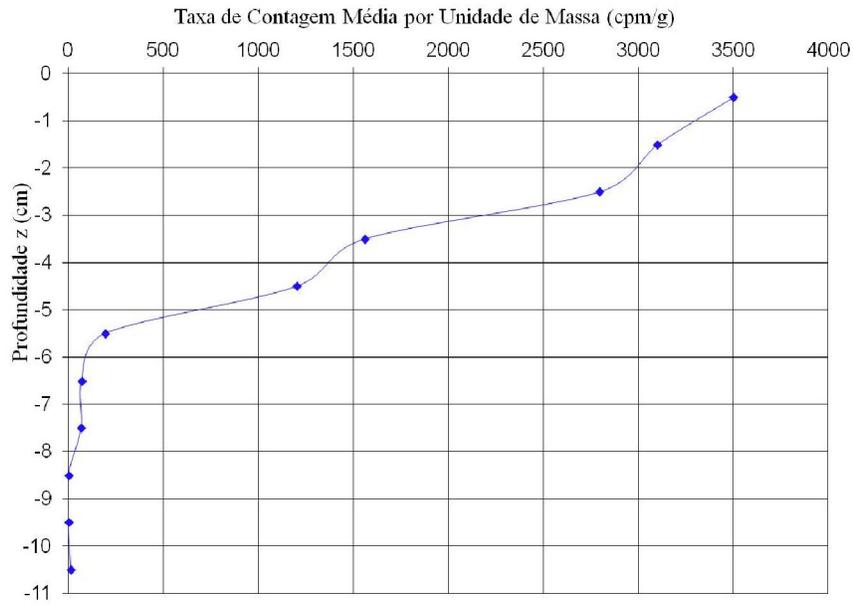
**Figura VI.18 – (a) Amostrador de sedimentos em profundidade  
(b) aparelho para cortar as amostras em fatias, nomeado “guilhotina”**

A determinação mais precisa da repartição de sedimentos em profundidade foi realizada no Instituto de Pesquisa Radioativas da UFMG e CNEN e os resultados foram expressos em contagens por minuto, por grama de material do leite, cpm/g.

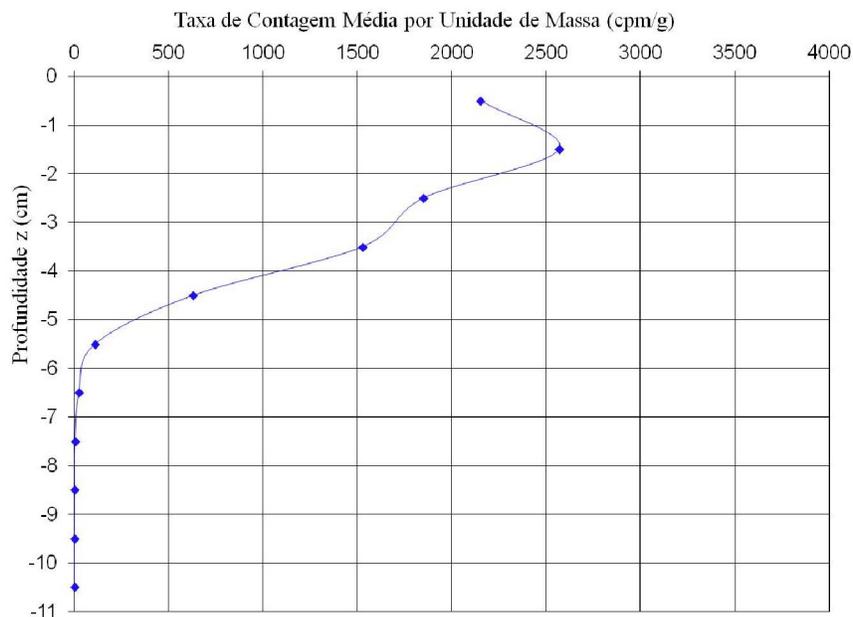
Apresentam-se, nas **Figuras VI.19 a VI.21**, as curvas médias de atividade específica do traçador em função da profundidade, para cada eixo longitudinal.



**Figura VI.19 – Atividade específica média na margem esquerda do Córrego Vinte e Um em função da profundidade**

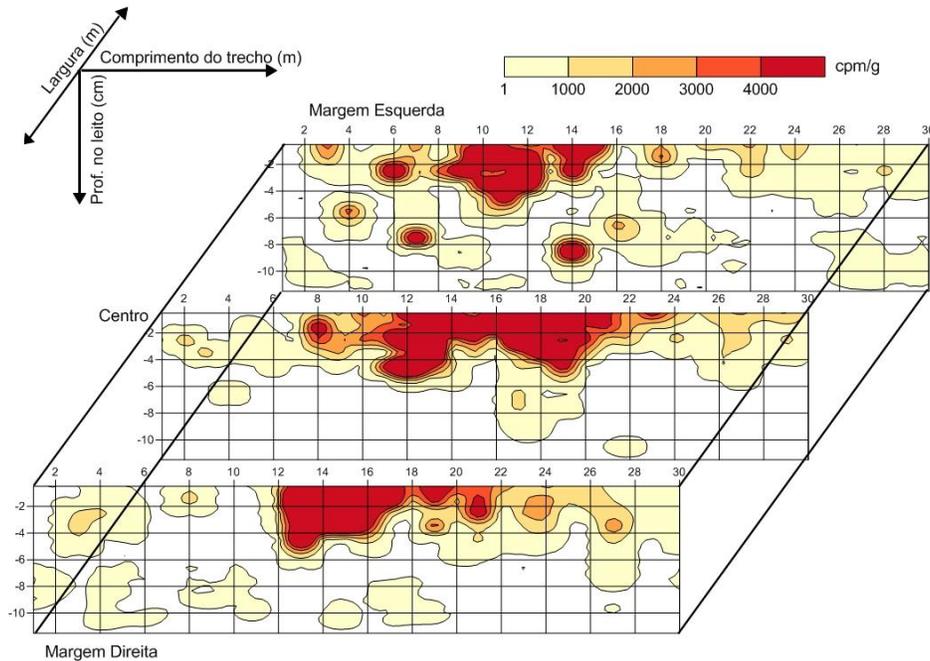


**Figura VI.20 – Atividade específica média no eixo longitudinal central do Córrego Vinte e Um em função da profundidade**



**Figura VI.21 – Atividade específica média na margem direita do Córrego Vinte e Um em função da profundidade**

As atividades em profundidade, detectadas em cada ponto de amostragem, foram utilizadas para o traçado das isolinhas de atividade ou taxas de contagem, em função da profundidade, o que permite visualizar o comportamento do sedimento radioativo, na camada móvel do leito, no trecho de medidas. As isolinhas de atividade específicas, em função da profundidade, nos eixos longitudinais de detecção, estão apresentadas na **Figura VI.22**, a seguir.



**Figura VI.22 – Distribuição das atividades específicas em com/g, em função da profundidade**

Junto com o cálculo indireto da espessura de transporte pelo o Método de Balanço das Taxas de Contagem, determinou-se também, o valor desta espessura através da medida direta das atividades específicas das amostras do leito, e da expressão:

$$E_{m\acute{e}dia} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i z_i \Delta z}{\sum_{i=1}^n c_i \Delta z} \quad (6.6)$$

onde  $c_i$  representa a taxa de contagem média por unidade de massa ou atividade específica, expressa em cpm/g, da amostra coletada na profundidade  $Z_i$ , e  $n$  o número total de amostras utilizadas.

Desta forma, obtém-se valores médios de espessura de transporte para cada ponto de amostragem. Na **Tabela VI.8** são apresentados os valores médios de cada amostra, e mínimos e máximos dos eixos longitudinais central e das margens esquerda e direita.

**Tabela VI.8 – Valores médios da espessura da camada de transporte do Córrego Vinte e Um**

<b>Seção transversal</b>	<b>Margem Esquerda (cm)</b>	<b>Centro (cm)</b>	<b>Margem Direita (cm)</b>
1	6,18	5,39	4,88
2	5,43	2,55	4,04
3	0,93	3,52	3,42
4	5,29	6,50	2,47
5	2,09	2,68	2,92
6	2,46	3,35	3,03
7	4,85	1,93	1,04
8	2,39	1,87	1,17
9	2,49	2,61	1,57
10	2,20	1,47	5,14
11	2,94	2,74	1,41
12	2,38	2,94	1,81
13	0,74	2,50	2,57
14	3,94	1,78	1,99
15	0,78	1,90	2,03
16	6,39	1,09	2,01
17	0,55	2,38	1,29
18	1,19	1,49	0,96
19	4,68	2,62	1,68
20	0,53	1,54	1,11
21	0,55	1,22	2,04
22	1,50	1,84	0,85
23	1,44	0,69	2,11
24	1,32	1,44	2,28
25	1,99	1,43	0,94
26	3,12	2,30	1,36
27	6,13	2,19	3,54
28	1,99	0,74	2,15
29	2,18	1,68	1,04
30	1,56	1,23	3,39
E mín.(cm)	0,53	0,69	0,85
E médio (cm)	2,67	2,25	2,21
E máx. (cm)	6,39	6,50	5,14

### VI.5.2 Determinação da Espessura de Transporte pelo Método do Balanço das Taxas de Contagem

A determinação da espessura de transporte é feita por iteração, utilizando-se a equação desenvolvida por COURTOIS e SAUZAY (1996), apresentada no Capítulo V, na seção V.5.

$$\frac{1}{\beta} \frac{\alpha}{f_0} \frac{N}{A} E = 1 - e^{-\alpha E} \quad (6.7)$$

Nesta equação, o valor do parâmetro adimensional  $\beta$  refere-se ao padrão teórico de distribuição do sedimento em profundidade, apresentado pelos autores do Método do Balanço das Taxas de Contagem.

Comparando-se as formas de distribuição de atividades específicas em função da profundidade, medidas no Córrego Vinte e Um e apresentadas nas Figuras VI.19 a VI.21, precedentes, com as formas teóricas de COURTOIS e SAUZAY (1966), reproduzidas por WILSON-JR.(1987), adotou-se o valor de  $\beta = 1,15$ , constante, para as três experiências.

$\alpha$  e  $f_0$  são coeficientes de calibração dos detectores colimados do material radioativo. Os valores destes coeficientes representam a lei de absorção da atividade do material radioativo em função da profundidade, definida pela Equação 5.7 precedente. Os valores de  $\alpha$  e  $f_0$  dependem do tipo do material do leito, do traçador e do equipamento de detecção adotado.

Para determinarem-se os valores de  $E$  (cm) na Equação 6.7, utilizaram-se os valores do número total de contagens,  $N_i$  (cps x cm<sup>2</sup>), ou seja, os mesmos valores utilizados para o cálculo da posição do centro de gravidade.

Finalmente, deve-se contar com a informação de  $A$  ( $\mu\text{Ci}$ ), que corresponde à atividade inicial injetada em cada experiência. Este valor de  $A$  foi determinado indiretamente utilizando os dados obtidos nas detecções do sedimento radioativo.

Presume-se que na primeira detecção realizada em cada experiência, o material radioativo não se encontra enterrado no leito, mas apenas espalhado. Como o total do material radioativo se encontra dentro do trecho representativo, quer dizer que o valor de  $N_i$  determinado na primeira detecção é uma boa aproximação da atividade inicial (A) injetada no escoamento. Para poder utilizar o valor de  $N_i$  da primeira detecção como valor de atividade se realizou a correção por decaimento radioativo, para levar a contagem ao momento da injeção. Além disso, foi utilizado o fator  $f_0$  (cps x cm<sup>2</sup> x  $\mu\text{Ci}^{-1}$ ) de cada experiência como parâmetro de transformação do valor de  $N_i$  (cps x cm<sup>2</sup>) no valor de atividade A ( $\mu\text{Ci}$ ).

Os valores da Espessura do Transporte, E, para todas as detecções das três experiências realizadas no Córrego Vinte e Um foram calculadas utilizando-se os valores de A,  $\beta$ ,  $f_0$ ,  $\alpha$  e N apresentados na Tabela VI.9, a seguir. Os valores da Espessura de transporte, E, assim obtidos, também estão relacionados na tabela, para todas as detecções.

**Tabela VI.9 – Valores estimados da espessura de transporte**

1ª Experiência			2ª Experiência			3ª Experiência		
$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	0,156		$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	0,156		$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	0,171	
$\beta$	1,15		$\beta$	1,15		$\beta$	1,15	
$f_0$ (cpsxcm <sup>2</sup> /μCi)	830		$f_0$ (cpsxcm <sup>2</sup> /μCi)	1700		$f_0$ (cpsxcm <sup>2</sup> /μCi)	4000	
A (μCi)	8066,14		A (μCi)	52360,55		A (μCi)	5365,26	
Deteção	E (cm)	N(cpsxcm <sup>2</sup> )	Deteção	E (cm)	N(cpsxcm <sup>2</sup> )	Deteção	E (cm)	N(cpsxcm <sup>2</sup> )
1	1,80	667,58	1	1,82	382,57	1	1,67	2144,95
2	1,84	665,27	2	2,39	366,66	2	2,81	1957,79
3	2,37	639,63	3	4,44	316,93	3	3,20	1898,77
4	2,46	635,75	4	5,21	300,72	4	3,98	1788,26
5	3,31	597,97	5	5,81	288,96	5	2,83	1954,80
6	2,61	628,92	6	6,05	284,38	6	5,23	1629,63
8	2,30	643,37	7	6,64	273,61	7	5,22	1630,56
9	3,70	581,53	8	7,03	266,79	8	5,92	1550,46
10	3,67	583,13	9	7,62	256,99	9	6,40	1498,70
14	2,71	624,10	10	8,04	250,41	10	6,95	1442,18
15	3,23	601,39	11	7,91	252,48	11	6,98	1439,26
16	3,83	576,29	12	8,26	246,99	12	7,05	1432,13
17	2,78	621,17	13	8,59	242,12	13	6,78	1459,10
18	3,49	590,56	14	8,59	242,01	14	6,74	1463,76
19	2,91	615,20	15	8,91	237,42	15	6,16	1524,11
20	3,56	587,39	16	8,42	244,54	16	5,57	1589,40
21	4,10	565,48	17	8,08	249,81	17	6,24	1515,96
23	2,88	616,66	18	8,53	242,99	18	6,43	1495,43
24	3,47	591,18	19	8,26	247,06	19	5,99	1542,75
25	3,57	587,09	20	8,60	241,91	20	6,34	1505,28
26	3,48	590,71	21	8,23	247,53	21	6,38	1501,25
27	3,05	290,94	22	8,58	242,24	22	6,18	1522,05
28	3,05	301,81	23	8,67	240,83	23	6,12	1528,47
29	3,05	291,20	24	8,71	240,32	-	-	-
30	3,05	293,35	25	9,77	225,52	-	-	-
-	-	-	26	10,48	216,45	-	-	-
E Mínimo	1,80	-	-	1,82	-	-	1,67	-
E Médio	3,05	-	-	7,24	-	-	5,37	-
E Máximo	4,10	-	-	10,48	-	-	7,05	-

## VI.6 CÁLCULO DA DESCARGA SÓLIDA POR ARRASTE PELO MÉTODO DO BALANÇO DAS TAXAS DE CONTAGEM

Para o cálculo da descarga sólida por arraste, com os dados obtidos das experiências com traçadores radioativos, utilizou-se a Equação 6.8, a seguir, semelhante à Equação 5.4, apresentada no item V.5:

$$Q_b = \gamma'_s L V_s E \quad (6.8)$$

onde,

- $Q_b$  = Descarga sólida por arraste, em  $[FT^{-1}]$ , N/d. por exemplo.
- $\gamma'_s$  = Peso específico do grão submerso, em  $N/m^3$ . nas duas primeiras experiências, onde o sedimento arenoso foi marcado com  $Au^{198}$ , foi utilizado o peso específico da areia submersa:  $\gamma'_s = 16209,9 N/m^3$ . Na terceira experiência, foi utilizado o vidro moído contendo  $Ir^{192}$ , cujo peso específico é igual a  $\gamma'_s = 16406,1 N/m^3$ .
- $L$  = Largura média de transporte de cada experiência, em m.
- $V_s$  = Velocidade média do centro de gravidade da nuvem radioativa, em m/d.
- $E$  = Espessura de transporte, em m.

Os valores das grandezas da Equação 6.8, utilizados para os cálculos da descarga sólida por Arraste do Córrego Vinte e Um estão apresentados na **Tabela VI.10**, a seguir.

**Tabela VI.10 – Valores das variáveis utilizadas para o cálculo da descarga sólida por arraste**

Variáveis	Símbolo/Unidades	1ª Experiência (Au <sup>198</sup> )	2ª Experiência (Au <sup>198</sup> )	3ª Experiência (Ir <sup>192</sup> )
Largura média	L (m)	3,16	3,07	3,42
Peso Específico Sedimento Submerso	$(\gamma_s - \gamma)$ (N/m <sup>3</sup> )	16209,9	16209,9	16406,1
Velocidade Média	U (m/d)	17,084	14,936	16,726
Espessura de Transporte	E <sub>mínimo</sub> (m)	0,0179	0,0182	0,0167
	E <sub>médio</sub> (m)	0,0305	0,0724	0,0537
	E <sub>máximo</sub> (m)	0,0410	0,1048	0,0705
<b>Descarga Sólida por arraste</b>				
Descarga sólida por arraste	Q <sub>bmínimo</sub> (kN/d)	15,72	13,50	15,66
	Q <sub>bmédio</sub> (kN/d)	26,70	53,80	50,41
	Q <sub>bmáximo</sub> (kN/d)	35,90	77,86	66,24
<b>Descarga Sólida por arraste por unidade de largura</b>				
Descarga sólida por arraste por unidade de largura	q <sub>bmínimo</sub> (N/s/m)	0,0576	0,0510	0,0530
	q <sub>bmédio</sub> (N/s/m)	0,0978	0,2029	0,1705
	q <sub>bmáximo</sub> (N/s/m)	0,1315	0,2936	0,2240

Desta forma, foram determinados três valores para a descarga sólida por arraste, que dependem do valor da espessura de transporte por arraste. Destes três, o valor médio será utilizado na calibração dos modelos de transporte de sedimentos por arraste adotados nesta dissertação, as quais serão apresentadas no **Capítulo VII**, a seguir.

## CAPÍTULO VII

### EXPRESSÕES UTILIZADAS PARA O CÁLCULO DA DESCARGA SÓLIDA DO MATERIAL DO LEITO

#### VII.1 PARCELAS DAS GRANDEZAS HIDRODINÂMICAS RESPONSÁVEIS PELO MOVIMENTO DE SEDIMENTOS

Segundo VIEIRA DA SILVA e WILSON-JR.(2005), a perda total de energia num escoamento com superfície livre, resulta das perdas parciais produzidas:

- pela configuração do leito, com geração de turbulência e calor;
- pela rugosidade dos grãos, com geração de movimento de sedimentos e migração do leito.

É necessário então considerar as parcelas da tensão tangencial média,  $\tau_o$ , relativas a essas resistências ao escoamento. A partição é feita, fazendo-se uma analogia com a resistência ao escoamento num conduto, a qual é composta de uma resistência de atrito devido às asperezas das paredes internas dos dutos, e de uma resistência de forma, devido aos alargamentos e reduções bruscas, tais como dobras, joelhos, ou de um modo geral, devido às variações nas geometrias dos condutos.

As parcelas da tensão tangencial média junto ao leito são:

- $\tau'_o$  devida à rugosidade dos grãos do leito, e
- $\tau_o - \tau'_o$  devida às configurações de fundo.

Para o cálculo das parcelas, EINSTEIN e BARBAROSSA (1952) parcelaram o raio hidráulico, enquanto MEYER-PETER e MÜLLER (1948) consideraram a declividade da linha d'água composta de duas parcelas (VIEIRA DA SILVA e WILSON-JR., 2005):

$$\tau'_o = \gamma R' S \quad (7.1)$$

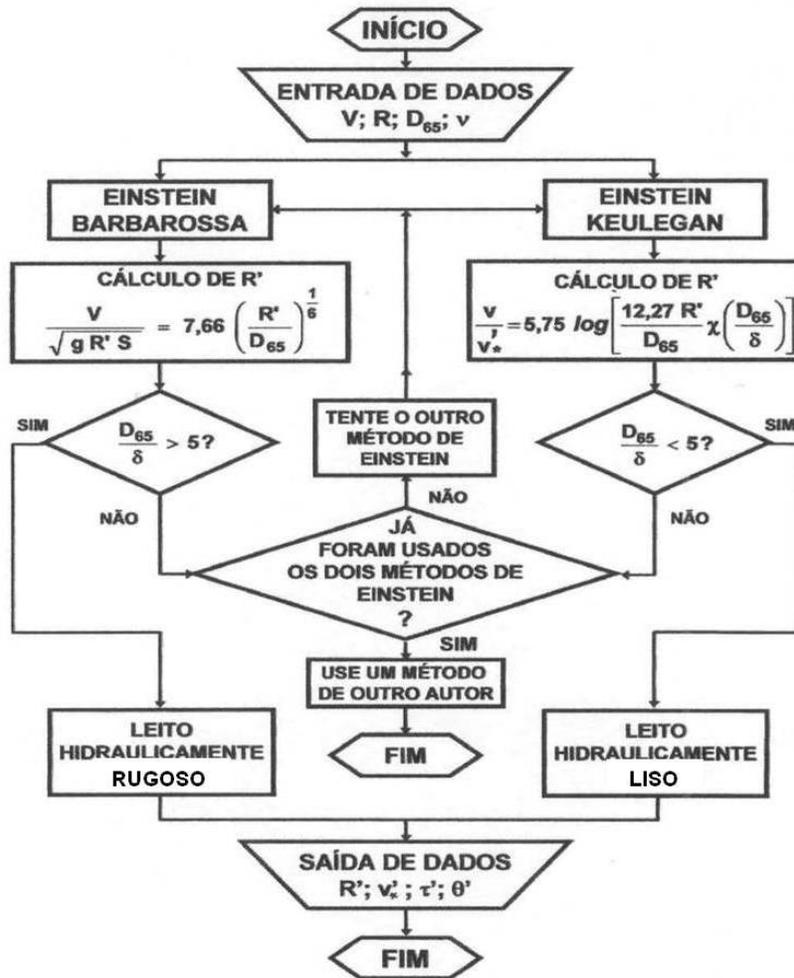
$$\tau_o = \gamma R' S + \gamma (R - R') S = \gamma R S' + \gamma R (S - S') \quad (7.2)$$

Os dois parcelamentos conduzem aos mesmos resultados, desde que se tenha:

$$R' S = R S' \quad (7.3)$$

Nesta dissertação, foi adotado o procedimento proposto por EINSTEIN e BARBAROSSA (1952) que considera o parcelamento do raio hidráulico. Para o cálculo

dos valores reduzidos,  $R'$ , aplicou-se nesta dissertação, o algoritmo para cálculo das variáveis reduzidas, proposto por WILSON-JR. (1973) e WILSON-JR., RODRIGUES e SANTOS (1980), reproduzido na **Figura VII.1**, a seguir.



**Figura VII.1 – Algoritmo para o cálculo das variáveis reduzidas, utilizando-se os métodos de Einstein-Barbarossa ou de Einstein-Keulegan (WILSON-JR., 1973; WILSON-JR., RODRIGUES e SANTOS, 1980; VIEIRA DA SILVA e WILSON-JR., 2005)**

Os valores assim obtidos, do raio hidráulico reduzido  $R'$ , foram utilizados nas aplicações das Equações de EINSTEIN (1950), VUKMIROVIC' e VUKOTIC'(1981) e VAN RIJN (1984), para a estimativa da descarga sólida do material do leito do Córrego Vinte e Um.

Desta forma a parcela da velocidade de atrito junto ao leito  $u'_*$ , responsável pelo movimento do sedimento do leito é igual a:

$$u'_* = \sqrt{g R' S} \quad (7.4)$$

e, assim para as demais variáveis que dependem de R'.

## VII.1 MÉTODO DE EINSTEIN

Segundo VIEIRA DA SILVA e WILSON-JR. (2005) o estudo de EINSTEIN (1950) é um dos mais aprofundados do ponto de vista científico sobre o movimento de sedimento por arraste em escoamentos com superfície livre. O estudo focaliza o início do transporte e a manutenção das partículas em movimento na estrutura turbulenta do escoamento e de sua influência no comportamento das variáveis hidrossedimentométricas.

A expressão mais simples apresentada por EINSTEIN (1950) relaciona analiticamente duas funções adimensionais:

- i) A **Função de Intensidade do Transporte** ou simplesmente **Função do Transporte**,  $\Phi$ , definida por:

$$\Phi = \frac{q_b}{\gamma_s \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}} g D^3} \quad (7.5)$$

onde :

- $q_b$  = descarga sólida por arraste por unidade de largura, em  $[FL^{-1}T^{-1}]$ ;
- $\gamma$  = peso específico da água;
- $\gamma_s$  = peso específica do sedimento seco do leito;
- $D$  = diâmetro característico do material em movimento por arraste; e
- $g$  = aceleração de gravidade.

- ii) A **Função Intensidade da Corrente** ( $\Psi$ ):

$$\Psi = \frac{(\gamma_s - \gamma)D}{\gamma R S} = \frac{1}{\theta} \quad (7.6)$$

que é o inverso da tensão normalizada ou adimensional  $\theta$ , apresentada por SHIELDS (1936). Trata-se de uma relação adimensional entre duas tensões, ou entre duas forças por unidade de área do leito: a força de resistência do grão de diâmetro  $D$ , devido ao seu peso submerso, pela força de cisalhamento exercida pelo fluido.

$R$  = raio hidráulico da seção transversal;

$S$  = declividade longitudinal do leito.

A partir das experiências em laboratório e em rios, EINSTEIN (1950) ajustou a seguinte curva de correlação entre as funções  $\Phi$  e  $\Psi$  :

$$\Phi = 2,151 e^{-0,391\Psi} \quad (7.7)$$

A qual permite a determinação da descarga sólida por unidade de largura  $q_{bi}$ , dos sedimentos de diâmetro  $D_i$  que se deslocam por arraste, no leito do escoamento.

Nas aplicações que serão apresentadas no próximo capítulo, serão utilizadas os valores reduzidos do raio hidráulico,  $R'$ , para os cálculos da Intensidade da Corrente (Equação 7.6) e da descarga sólida por arraste,  $q_b$  (Equações 7.7 e 7.5).

### VII.3 MÉTODO DE VUKMIROVIĆ E VUKOTIĆ (1981)

VUKMIROVIĆ e VUKOTIĆ (1981) realizaram uma série de estudos hidráulicos e sedimentológicos usando métodos clássicos e com traçadores radioativos, nos Rios Sava e Savinja, na Iugoslávia, para a estimativa da descarga sólida por arraste por unidade de largura,  $q_b$ . Determinaram, os valores das funções adimensionais de Intensidades da Corrente  $\Psi$  e do Transporte  $\Phi$ , de EINSTEIN (1950), definidas pelas Equações (7.6) e (7.5), respectivamente.

Mas, em vez de usarem a relação analítica obtida por EINSTEIN (1950), a expressão que melhor se ajustou aos dados dos rios estudados, foi do tipo:

$$\Phi = a(\theta - \theta_0)^3 \quad (7.8)$$

onde  $a$  é uma constante positiva de proporcionalidade,  $\theta_0$  corresponde à tensão tangencial crítica normalizada que caracteriza o movimento incipiente por arraste do grão de sedimento,  $\theta$  corresponde à tensão tangencial normalizada do escoamento utilizada por SHIELDS (1936) e ENGELUND (1966) (WILSON-JR., RODRIGUES e SANTOS, 1980, da Equação 7.9, a seguir:

$$\theta = \frac{\gamma R S}{(\gamma_s - \gamma) D} = \frac{1}{\Psi} \quad (7.9)$$

onde o diâmetro característico do sedimento do Córrego Vinte e Um foi o diâmetro mediano do material por arraste.

Os coeficientes  $a$  e  $\theta_0$  foram determinados para a seção de medidas denominada Letus', do Rio Savinja, obtendo-se a Equação (7.10) usadas por VUKMIROVIC' e VUKOTIC' (1981):

$$\Phi = 40(\theta - 0,146)^3 \quad (7.10)$$

Obtido o valor da Função Adimensional de Transporte,  $\Phi$ , calcula-se a descarga sólida por arraste  $q_b$  (N/m/s) utilizando-se a expressão de EINSTEIN (1950), apresentada na Equação 7.5.

Com os dados obtidos no Córrego Vinte e Um pretende-se ajustar os parâmetros  $a$  e  $\theta_0$  da Equação (7.9) e verificar se esta expressão, com o expoente 3 utilizado por VUKMIROVIC' e VUKOTIC' (1981), se ajusta aos dados obtidos com traçador radioativo. Caso contrário, novos valores para  $a$  e  $\theta_0$  serão ajustados para o Córrego Vinte e Um.

#### VII.4 MÉTODO DE VAN RIJN

Este método estima o transporte por arraste do material do leito de sedimento de diâmetro compreendido entre 0,200 e 2,000 mm, ou seja, de areias finas a muito grossas, segundo a classificação da “American Geophysical Union, USA”.

VAN RIJN (1984) utilizou os seguintes parâmetros adimensionais:

- **Função adimensional de transporte,  $\Phi$** , de EINSTEIN (1950), expressa por:

$$\Phi = \frac{q_b}{\sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g D^3}} \quad (7.11)$$

onde:

$q_b$  = descarga sólida por unidade de largura, em  $[L^2T^{-1}]$

- **Diâmetro adimensional do grão,  $D_*$** , como apresentado por ACKERS-WHITE (1973):

$$D_* = D_{50} \left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\rho v^2} \right)^{1/3} \quad (7.12)$$

- **Parâmetro da Etapa ou Estágio de Transporte,  $T$** :

$$T = \frac{\tau'_0 - \tau_{0c}}{\tau_{0c}} = \frac{u_*'^2 - u_{*c}^2}{u_{*c}^2} \quad (7.13)$$

A equação volumétrica da descarga sólida por arraste,  $q_b$ , por unidade de largura, obtida por VAN RIJN (1984) relaciona entre si estes três parâmetros adimensionais (ASCE, 2007):

$$\Phi = 0,053 \frac{T^{2,10}}{D_*^{0,30}} \quad (7.14)$$

#### VII.4.1 Velocidade de Atrito Crítica, $u_{*c}$

Segundo SOUZA (2010), o parâmetro  $T$  expressa a mobilidade do grão de sedimento em termos de velocidade de atrito do escoamento sobre os grãos do leito, e da velocidade de atrito crítica do movimento incipiente, obtida diretamente da curva de equilíbrio apresentada na **Figura VII.2**, a seguir.

No gráfico desta figura, VAN RIJN (1984) substituiu o Número de Reynolds do Grão,  $R_e^*$ , considerado por SHIELDS (1936), pelo Diâmetro Adimensional do Grão  $D_*$ . a curva de equilíbrio obtida foi aproximada, analiticamente, pelo sistema de equações:

$$\theta_c = \begin{cases} 0,24 \times D_*^{-1} & D_* \leq 4 \\ 0,14 \times D_*^{-0,64} & 4 < D_* \leq 10 \\ 0,04 \times D_*^{-0,10} & 10 < D_* \leq 20 \\ 0,013 \times D_*^{0,29} & 20 < D_* \leq 150 \\ 0,055 & D_* > 150 \end{cases} \quad (7.16)$$

onde  $\theta_c$  é a tensão tangencial normalizada crítica de SHIELDS (1936), dada por:

$$\theta_c = \frac{\rho u_{*c}^2}{(\rho_s - \rho)g D_{50}} = \frac{\tau'_{0c}}{(\gamma_s - \gamma)D_{50}} \quad (7.16)$$

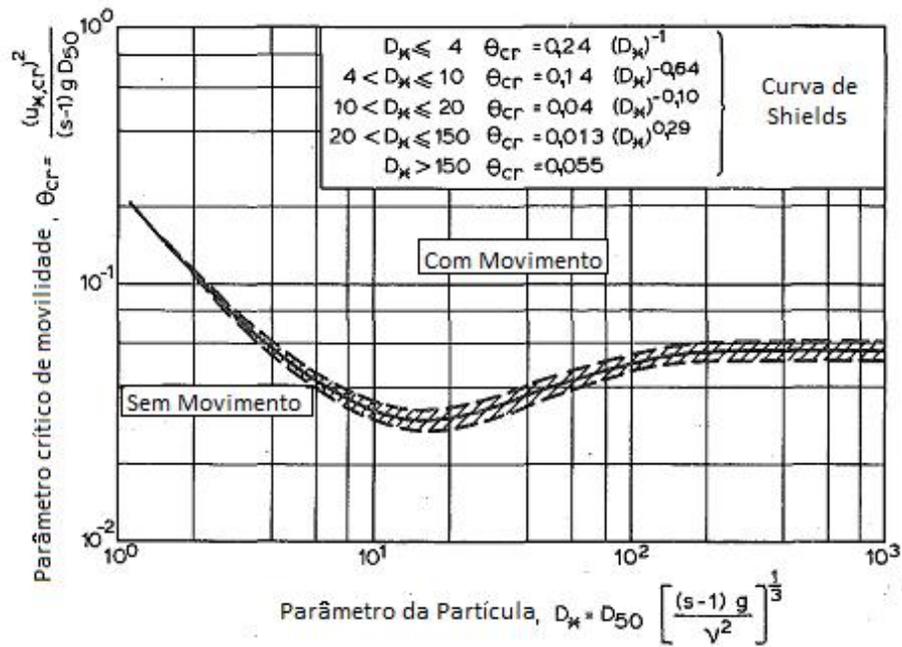


Figura VII.2 – Movimento Incipiente do Grão segundo VAN RIJN (1984)

Conhecido o valor de  $\theta_c$ , a velocidade crítica de cisalhamento junto ao fundo, é determinada, colocando-se  $u_{*c}$  em evidência, na Equação (7.16), obtendo-se:

$$u_{*c} = \sqrt{(s-1)g D_{50} \theta_c} \quad (7.17)$$

onde:

$$s = \frac{\rho_s}{\rho} \quad (7.18)$$

#### VII.4.1 Velocidade de Atrito Crítica do Grão, $u'_{*c}$

Esta parcela foi descrita por VAN RIJN (1984) em função da velocidade média do escoamento ( $u$ ), ou da velocidade média na vertical ( $u_z$ ), dependendo se o estudo for uni ou bidimensional, e do coeficiente de Chézy,  $C'$ , relativo ao grão de sedimento:

$$u'_{*c} = \frac{\sqrt{g}}{C'} U \quad (7.19)$$

Para o cálculo do coeficiente de Chézy,  $C'$ , VAN RIJN(1984), além de considerar a perda de energia do escoamento devida às configurações de fundo, considera, também, a perda devida às paredes laterais do canal. Utiliza a expressão:

$$C' = 18 \log \left( 4 \frac{R_b}{D_{90}} \right) \quad (7.20)$$

$R_b$  é o raio hidráulico corrigido, no qual se procura eliminar a influencia das paredes laterais. Para isto, VAN RIJN (1984) adotou o método proposto por VANONI e BROOKS (1957) e VANONI e HWANG (1967), onde se considera a perda de carga relativa do fundo do escoamento em relação à perda total na seção transversal. Assim, tem-se:

$$R_b = \frac{f_b}{f} R' \quad (7.21)$$

onde,  $f_b$  e  $f$  correspondem aos fatores de atrito ou de perda de energia do escoamento devido ao atrito com o leito ( $f_b$ ) e com todo o perímetro molhado da seção transversal ( $f$ ).

O fator de atrito,  $f$ , através da seção transversal é dado pela equação de Darcy-Weisbach, que segundo GRAF (1971) é um coeficiente que não considera as perdas de carga devido as formas de fundo.

$$f = 8 \frac{g R S}{U^2} = 8 \left( \frac{u_*}{U} \right)^2 \quad (7.22)$$

VANONI e BROOKS (1957) e VANONI e HWANG (1967) propuseram, também, a seguinte expressão para o cálculo do fator de atrito do leito,  $f_b$ :

$$f_b = f + \frac{2h}{B} (f - f_w) \quad (7.23)$$

onde  $B$  e  $h$  correspondem à largura da superfície livre e à profundidade média da seção transversal do escoamento, respectivamente.  $f_w$  representa o fator de atrito relativo às paredes, o qual depende da relação adimensional  $R_e/f$ , onde  $R_e$  é o Número de Reynolds do escoamento, através da seção transversal de raio hidráulico,  $R$ . tem-se então:

$$R_e = \frac{UR}{\nu} \quad (7.24)$$

e:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{R_e}{f} < 5,4 \times 10^5 & f_w = 0,476 \left( \frac{R_e}{f} \right)^{-0,215} \\ 5,4 \times 10^5 < \frac{R_e}{f} \leq 8,0 \times 10^6 & f_w = 0,315 \left( \frac{R_e}{f} \right)^{-0,185} \\ 8,0 \times 10^6 < \frac{R_e}{f} & f_w = 0,197 \left( \frac{R_e}{f} \right)^{-0,155} \end{array} \right. \quad (7.25)$$

Percorrendo o caminho inverso, ou seja, das Equações (7.24) e (7.25) a (7.19), determina-se a velocidade de atrito crítica,  $u'_{*c}$ , relativa ao grão de sedimento do leito, e das Equações (7.12),(7.15) a (7.17), calcula-se a velocidade crítica,  $u_{*c}$ .

Introduzindo-se os valores, assim obtidos, na Equação (7.13), obtém-se o valor do Parâmetro de Etapa ou Estágio de transporte,  $T$ .

Finalmente, conhecidos os valores de  $D_*$  (Equação 7.12) e  $T$ , determina-se o valor da Intensidade de Transporte,  $\Phi$ , e da descarga sólida por arraste por unidade de largura, dada na Equação (7.11) em  $[L^2T^{-1}]$ .

Tendo em vista que o leito do Córrego Vinte e Um apresentou-se, durante o período de medições hidrossedimentométricas, de junho de 1974 a agosto de 1975, coberto por dunas e rugas, calcularam-se, também, como foi feito para os Métodos de EINSTEIN (1950) e VUKMIROVIC' e VUKOTIC' (1981), os valores reduzidos de  $R'$ ,  $u'_{*c}$ ,  $\tau'$  e  $\theta'$ , dentre outras variáveis. Utilizou-se para esses cálculos, o algoritmo apresentado na **Figura VII.1**. Como será apresentado no Capítulo VIII: Resultados do Cálculo da Descarga Sólida por Arraste, as variáveis  $R$ ,  $R_b$ ,  $f_b$ , e  $u_*$  que constam das Equações (7.20) a (7.25) foram substituídas pelas suas respectivas variáveis reduzidas:  $R'$ ,  $R_b'$ ,  $f_b'$  e  $u'_{*c}$ .

#### VII.4 EQUAÇÃO DAS DUNAS E RUGAS

Esta equação calcula a descarga sólida por arraste em função da velocidade média  $V_d$  de deslocamento e da altura média  $h_d$  das configurações do leito, ou seja:

$$q_b = f(V_d, h_d) \quad (7.26)$$

A equação das dunas e rugas foi deduzida por SIMONS, RICHARDSON e NORDIN (1965) e aplicada em canais de laboratório tendo sido considerado os resultados de 101 estudos com leito móvel de areia. Embora a idéia de determinar-se o transporte por arraste a partir da velocidade de deslocamento das formas de fundo não seja nova (HUBBEL, 1964 *apud* SIMONS, RICHARDSON e NORDIN., 1965), o avanço nas tecnologias de registro das configurações de fundo em escoamento com superfície livre, tornou o método viável para determinação da descarga sólida por arraste.

Num escoamento em equilíbrio sedimentológico, as formas de fundo são do tipo rugas e dunas, em que o material transportado por arraste se movimenta em contato quase contínuo com o leito. O material desloca-se sobre a duna ou ruga até sua crista, de onde cai no cavado da configuração, podendo ser enterrada por outras partículas em movimento.

Para configurações do leito tipo dunas e rugas, a partícula inicia seu movimento na região de inclinação positiva, onde as linhas de corrente do escoamento são próximas do leito, e deposita-se na região de inclinação negativa, onde as linhas de corrente do escoamento se afastam do leito.

A equação de continuidade do movimento de sedimento ou de equilíbrio do leito móvel, válida para qualquer tipo de configuração de fundo, é a seguinte:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial q_b}{\partial x} = 0 \quad (7.27)$$

onde

$q_b$  = descarga sólida ou taxa volumétrica de sedimentos por arraste, por unidade de largura, em  $[L^2T^{-1}]$ .

$\lambda$  = a porosidade da camada ativa do leito.

*“Esta equação é geral e válida para qualquer tipo de configuração de fundo, já que não foi imposta nenhuma condição sobre o tipo de forma de fundo existente no leito do escoamento. Ela também é conhecida como Equação da Continuidade do Movimento das Formas de Fundo ou Equação de EXNER-POLYA, por terem sido estes autores os primeiros a considerá-la*

*A equação pode ser utilizada como condição de contorno do movimento de sedimentos em suspensão que se*

*depositam sobre o fundo de um escoamento. Fisicamente, a equação mostra que a taxa de variação natural da cota do leito móvel de um rio deve-se à variação longitudinal da descarga sólida do material do leito.”(VIEIRA DA SILVA e WILSON-JR., 2005)*

A Equação (7.27) pode ser resolvida (SIMONS, RICHARDSON e NORDIN., 1965) para leitos cobertos de dunas e/ou rugas estacionárias. Nestes casos, a resultante do movimento de sedimento das partículas de sedimentos, num intervalo de tempo mensurável, é igual ao deslocamento de módulos triangulares de espessura igual à metade da altura  $h_d$  da configuração de fundo.

Nestes casos, tem-se:

$$q_b = \frac{1}{2}(1 - \lambda)V_d h_d \quad (7.28)$$

Durante os trabalhos com traçadores radioativos, realizaram-se, continuamente, registros longitudinais das configurações de fundo - Lagrangeanos, e registros temporais, em seções transversais fixas – Eulerianos, com um equipamento conhecido por C-Meter (WILSON-JR.e PAIVA, 2003).

O C-Meter é um equipamento de ultrassom, originalmente concebido para medir espessuras de peças de aço e corpos metálicos, que foi adaptado para medir espessuras de água, com calibrações realizadas em laboratório e no trecho do Córrego Vinte e Um. Ele foi acoplado ao suporte do detector localizado no eixo central do escoamento. Assim, à medida que o emissor-receptor ultrassonográfico do C-Meter se deslocava ao longo do escoamento, registravam-se as formas de fundo, e, simultaneamente, as taxas de contagem emitidas pelos radioisótopos, com os detectores de radioatividade.

Desta forma, tem-se a mesma quantidade de registros longitudinais: de forma de fundo e de radioatividade. No intervalo de tempo entre os registros longitudinais, o equipamento de ultrassom permaneceu fixado numa seção transversal para o registro temporal das variações do fundo.

Dos registros originais Lagrangeanos e Eulerianos das configurações de fundo são obtidos os valores dos comprimentos, das alturas e dos tempos de passagem das configurações pelas seções fixas do trecho representativo, respectivamente.

Os valores de  $V_d$  e  $h_d$  da Equação (7.28) foram calculados, utilizando-se as seguintes expressões:

$$V_d = \frac{\overline{L}_d}{\overline{L}_t} \quad (7.29)$$

$$h_d = H_d + S_{xth} \quad (7.30)$$

onde:

$\overline{L}_d$  = valor médio do comprimento das cristas e/ou cavados das configurações de fundo registrados durante as detecções longitudinais dos traçadores radioativos;

$\overline{L}_t$  = valor médio do tempo de passagem das cristas e/ou cavados das configurações de fundo pelas seções transversais fixadas durante as detecções temporais dos traçadores radioativos, entre os levantamentos dos perfis transversais batimétricos e das taxas de contagens;

$H_d$  = altura média das configurações de fundo medidas durante os levantamentos longitudinais e temporais, e;

$S_{xth}$  = desvio padrão da altura das configurações de fundo, obtido dos registros longitudinais e temporais.

Neste Capítulo apresentaram-se as equações EINSTEIN (1950), VUKMIROVIC' e VUKOTIC' (1981), VAN RIJN (1984) e a equação das Dunas e Rugas desenvolvida por SIMONS, RICHARDSON e NORDIN (1965). Estas equações serão utilizadas no **Capítulo VIII**, a seguir, para a estimativa da descarga sólida por arraste do Córrego Vinte e Um.

## CAPÍTULO VIII

### CÁLCULO DA DESCARGA SÓLIDA POR ARRASTE E EM SUSPENSÃO

#### VIII.1 CAMPANHA INTENSIVA DE MEDIDAS

Esta campanha foi realizada sob condições hidrológicas bem definidas, no início do período de chuvas (12 a 22 de outubro de 1974) e no início do movimento de sedimentos na bacia hidrográfica. Foram realizadas, simultaneamente, as medições das campanhas periódicas e diárias, acrescidas de levantamentos topobatimétricos de seções transversais e longitudinais do trecho do Córrego Vinte e Um, para conhecimento, entre outros, das declividades do leito e da linha d'água, e registro das características (amplitude e comprimento) das configurações do leito móvel.

As finalidades específicas dessas medições foram:

- ✓ determinar as características do leito móvel do Córrego Vinte e Um, para os cálculos das descargas sólidas;
- ✓ medir a descarga sólida por arraste dos sedimentos do leito com uso de traçadores radioativos, para calibração e validação das fórmulas do movimento de sedimentos, e modelagem hidrossedimentológica do trecho estudado.

Os resultados das *campanhas de observações periódicas* permitem que sejam feitas hipóteses e considerações sobre o movimento de sedimentos e que sejam obtidas as leis de transporte sólido, ou seja, as relações analíticas entre as variáveis hidráulicas e sedimentológicas. Os resultados das *campanhas diárias* permitem que essas relações sejam aplicadas para o ciclo(s) hidrológico(s) estudado(s), enquanto as *medições especiais* permitem verificar e calibrar as expressões e modelos do movimento sólido.

Nesta dissertação, e principalmente neste Capítulo VIII, estão sendo apresentados e discutidos os resultados das:

- Medições diretas do movimento de sedimentos por arraste com uso de traçadores radioativos (Capítulo V).
- Levantamentos topobatimétricos (**Figuras IV.5 e IV.6**), incluindo registro das configurações de fundo.

- Determinação das características médias diárias hidráulicas e sedimentológicas do Córrego Vinte e Um.
- Determinações qualitativas e quantitativas do movimento de sedimentos do Córrego Vinte e Um.
- Comparação dos resultados obtidos com as Expressões do Transporte por Arraste: de EINSTEIN (1950), VUKMIROVIC' (1981) e VAN RIJN (1984) com o uso de traçadores radioativos.

Durante as campanhas com traçadores radioativos foram realizadas duas medições de vazões líquidas por experiência, as quais permitiram calcular a área molhada (A), a largura da superfície livre (B) durante a medição, a profundidade média (h), o raio hidráulico (R), a velocidade média ou debitante (U), e a vazão líquida (Q), cujos valores estão reproduzidos na **Tabela VIII.1**, a seguir.

**Tabela VIII.1 – Variáveis Hidrodinâmicas obtidas durante as Medições de Vazão Líquida do Córrego Vinte e Um**

Experiência	Data	Hora	A (m <sup>2</sup> )	B (m)	h (m)	R (m)	U (m/s)	Q (m <sup>3</sup> /s)
I <sup>a</sup>	12/10/1974	12:50	0,964	4,000	0,241	0,229	0,432	0,417
		13:30	0,936	4,000	0,234	0,221	0,469	0,438
II <sup>a</sup>	16/10/1974	16:07	0,925	4,000	0,231	0,219	0,462	0,427
		16:45	0,882	3,850	0,229	0,224	0,473	0,417
III <sup>a</sup>	21/10/1974	15:00	0,837	4,000	0,209	0,200	0,467	0,391
		15:41	0,844	4,000	0,211	0,201	0,460	0,388

Dos registros batimétricos realizados em conjunto com as detecções dos traçadores radioativos, obtiveram-se os valores das declividades máxima, média e mínima do eixo longitudinal central do leito do Córrego Vinte e Um, para cada experiência. Na **Tabela VIII.2** apresentam-se os valores da declividade determinada para cada detecção, assim como os valores mínimos, médios e máximos obtidos durante as experiências com traçadores radioativos.

**Tabela VIII.2 – Valores das declividades do eixo longitudinal do Córrego Vinte e Um, obtidos durante as detecções do traçador radioativo**

Detecção	1ª Experiência		2ª Experiência		3ª Experiência	
	12/10/1974		16/10/1974		21/10/1974	
	Hora (h:min)	S (cm/km)	Hora (h:min)	S (cm/km)	Hora (h:min)	S (cm/km)
1	12:29	204,0	11:40	245,0	17:36	191,0
2	12:40	168,0	11:56	271,0	17:52	161,0
3	12:54	211,0	13:14	252,0	18:06	217,0
4	13:10	228,0	13:31	267,0	19:02	232,0
5	13:24	212,2	14:32	234,0	19:15	190,0
6	13:36	168,0	14:45	242,0	20:28	181,0
7	14:32	255,0	15:50	233,0	20:49	193,0
8	14:43	210,0	16:03	257,0	22:01	-
9	15:15	173,0	17:11	-	22:20	210,0
10	15:32	199,3	17:25	-	23:36	199,0
11	16:40	227,0	18:41	264,0	23:52	208,0
12	16:52	221,0	18:55	249,0	02:21	217,0
13	17:04	226,0	20:18	272,0	02:35	214,0
14	18:08	224,0	20:30	295,0	03:48	217,0
15	18:38	233,1	22:03	232,0	04:05	220,0
16	19:36	238,0	22:17	227,0	05:32	224,0
17	20:36	231,0	23:15	235,0	05:48	190,0
18	20:52	229,0	23:32	207,0	07:13	202,0
19	23:26	222,0	00:41	256,0	07:42	205,0
20	23:44	-	00:55	281,0	09:17	219,0
21	00:55	239,0	02:11	172,0	09:56	197,0
22	01:10	207,0	02:28	277,0	11:26	217,0
23	02:15	209,0	03:32	211,0	11:41	214,0
24	02:29	215,0	03:46	244,0		
25	03:36	200,6	04:43	262,0		
26	03:52	252,0	04:57	231,0		
27	09:29	168,0				
28	10:41	187,7				
S <sub>mínima</sub>		168,00		172,00		161,00
S <sub>média</sub>		213,26		246,50		205,36
S <sub>máxima</sub>		255,00		295,00		232,00

## VIII.2 REGIMES HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS OCORRIDOS DURANTE OS ENSAIOS COM TRAÇADORES RADIOATIVOS

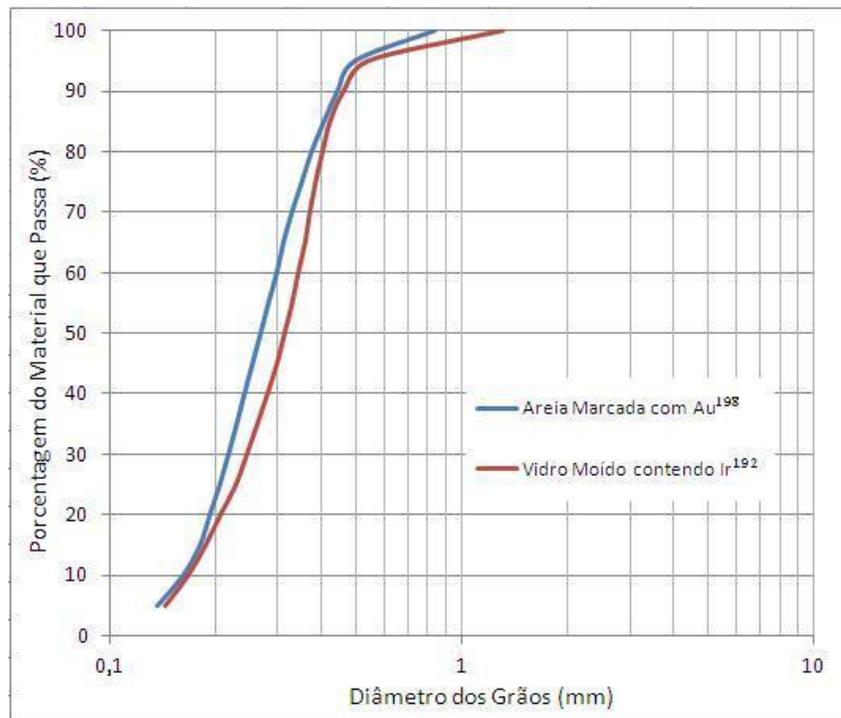
As análises hidrossedimentométricas foram realizadas para cada experiência de traçador radioativo. Os regimes de escoamento analisados corresponderam a pares de valores do raio hidráulico e da velocidade média, obtidos durante as medições de vazão líquida. Estes valores foram associados aos valores mínimo, médio e máximo da declividade longitudinal do eixo central do leito do escoamento e da descarga sólida por unidade de largura, medidos durante as detecções do movimento dos traçadores radioativos. Desta forma, foram consideradas as 3 experiências, e para cada uma: 3 pares de valores da declividade do eixo longitudinal (**S**) e da descarga sólida por unidade de largura (**q<sub>b</sub>**), 2 pares de valores do raio hidráulico (**R**) e da velocidade média (**U**), perfazendo um total de  $3 \times 3 \times 2 = 18$  regimes hidrossedimentométricos do Córrego Vinte e Um.

Cada experiência conta também com os valores dos diâmetros característicos dos sedimentos de fundo (**D<sub>i</sub>**) que foram injetados no leito do escoamento, e dos valores do peso específico do grão de sedimento  $\gamma_s$ , que no caso da primeira e segunda experiências com  $\text{Au}^{198}$  correspondem a  $25.996,5 \text{ N/m}^3$ , e no caso da terceira experiência, com  $\text{Ir}^{192}$ , corresponde a  $26.192,7 \text{ N/m}^3$ . O valor do peso específico  $\gamma$ , da água, para a temperatura de  $21^\circ\text{C}$  registrada no período dos ensaios, foi igual a  $9.786,6 \text{ N/m}^3$ . Assim, os pesos específicos dos grãos de sedimentos submersos foram iguais a:  $16.209,95 \text{ N/m}^3$  no caso da areia marcada com ouro radioativo, e  $16.406,15 \text{ N/m}^3$ , para o vidro moído contendo irídio. Esses regimes hidrossedimentológicos estão resumidos na **Tabela VIII.3**, a seguir.

Na **Figura VIII.1** estão apresentadas as curvas granulométricas do sedimento do leito marcado com  $\text{Au}^{198}$  que foi utilizado nas duas primeiras experiências, e do vidro moído contendo  $\text{Ir}^{192}$ , usado para simulação do sedimento de fundo, na terceira experiência. Para o cálculo da descarga sólida por arraste pelo método de EINSTEIN (1950), foram utilizados os diâmetros médios das classes granulométricas cujas frequências de ocorrência foi igual a 0,05 (5%).

**Tabela VIII.3 – Regimes hidrossedimentológicos do Córrego Vinte e Um, ocorridos durante os ensaios com traçadores radioativos**

Experiência	Regimes	R (m)	U (m/s)	Fr	Q (m³/s)	$\gamma_s$ (N/m³)	$\gamma$ (N/m³)	D <sub>50</sub> (mm)	S (cm/km)	Q <sub>b</sub> (N/s)	q <sub>b</sub> (N/m.s)
I <sup>a</sup>	I	0,229	0,432	0,288	0,417	25.996,5	9.786,6	0,269	168,00	0,1819	0,0576
	II	0,221	0,469	0,319	0,438				213,00	0,3090	0,0978/
	III	0,229	0,432	0,288	0,417				255,00	0,4155	0,1315
	IV	0,221	0,469	0,319	0,438						
	V	0,229	0,432	0,288	0,417						
	VI	0,221	0,469	0,319	0,438						
II <sup>a</sup>	VII	0,219	0,462	0,315	0,427	25.996,5	9.786,6	0,269	172,00	0,1562	0,0510
	VIII	0,224	0,473	0,319	0,417				246,50	0,6227	0,2029
	IX	0,219	0,462	0,315	0,427				295,00	0,9011	0,2936
	X	0,224	0,473	0,319	0,417						
	XI	0,219	0,462	0,315	0,427						
	XII	0,224	0,473	0,319	0,417						
III <sup>a</sup>	XIII	0,200	0,467	0,333	0,339	26.192,7	9.786,6	0,312	161,00	0,1813	0,0530
	XIV	0,201	0,460	0,328	0,337				205,36	0,5834	0,1705
	XV	0,200	0,467	0,333	0,339				232,00	0,7666	0,2240
	XVI	0,201	0,460	0,328	0,337						
	XVII	0,200	0,467	0,333	0,339						
	XVIII	0,201	0,460	0,328	0,337						



**Figura VIII.1 – Curvas granulométricas dos traçadores radioativos injetados no Córrego Vinte e Um (RODRIGUES e WILSON-JR., 1974)**

### VIII.3 PARCELAS DAS GRANDEZAS HIDRODINÂMICAS RESPONSÁVEIS PELO MOVIMENTO DE SEDIMENTOS

Para a utilização das equações de EINSTEIN (1950), VUKMIROVIC' e VUKOTIC'(1981) e VAN RIJN (1984), é necessário calcular a parcela  $\tau'$  da tensão tangencial do escoamento sobre o fundo  $\tau_0$ , devida à rugosidade do leito, ou seja, a parcela  $\tau'$  responsável pelo movimento de sedimentos.

Nestes estudos, foi utilizado o procedimento proposto por EINSTEIN e BARBAROSSA (1952) e EINSTEIN-KEULEGAN (VIEIRA DA SILVA e WILSON-JR., 2005), de acordo com o algoritmo apresentado na **Figura VII.1**, precedente, para o cálculo da parcela  $R'$  do raio hidráulico da seção de medidas.

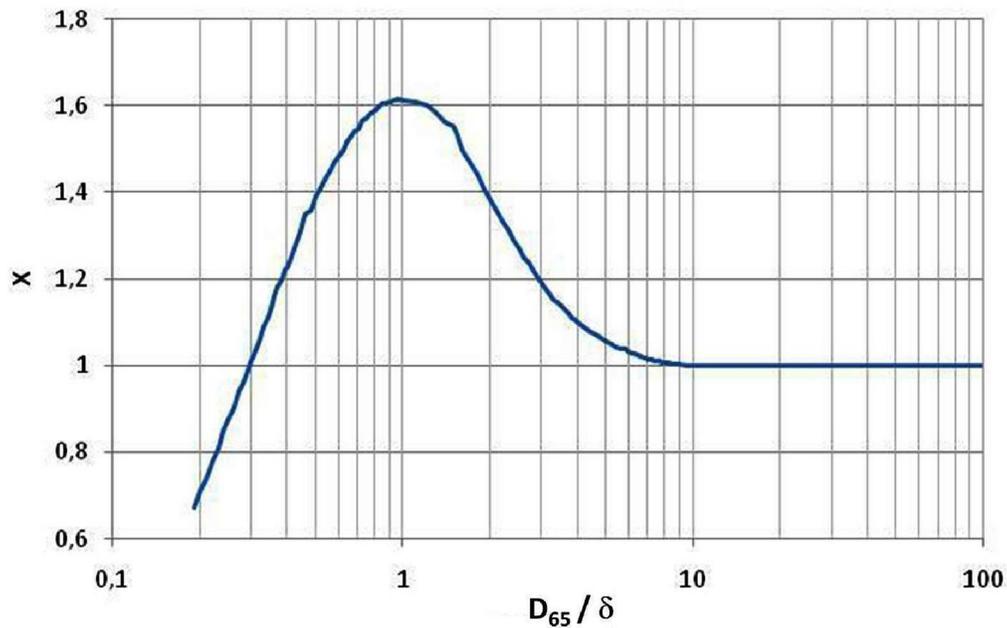
Cabe destacar que no estudo de VAN RIJN (1984), o raio hidráulico reduzido  $R'$  sofre uma nova modificação devido às interações do escoamento com as paredes laterais do canal, de acordo com a sequência de Equações (7.20) a (7.25), apresentada no capítulo anterior.

No algoritmo da **Figura VII.1**,  $\delta$  representa a espessura da região de escoamento laminar, onde as características viscosas são predominantes em relação às características turbulentas:

$$\delta = \frac{11,6 \nu}{u_*'} \quad (8.1)$$

Para o cálculo da função  $X (D_{65}/\nu)$ , denominada Fator de Correção de Einstein, foi utilizado o gráfico da **Figura VIII.2**, de acordo com a metodologia proposta por WILSON-JR., RODRIGUES e SOARES (1980) e reproduzida em VIEIRA DA SILVA e WILSON-JR. (2005).

Na **Tabela VIII.4** estão apresentados os principais valores utilizados e obtidos da aplicação do algoritmo ilustrado na **Figura VII.1**, para determinação dos valores reduzidos de  $R'$  e das demais variáveis hidrossedimentológicas básicas, obtidos durante as experiências realizadas com traçadores radioativos. Estes valores serão utilizados nas estimativas da descarga sólida do movimento por arraste dos sedimentos do leito do Córrego Vinte e Um.



**Figura VIII.2 – Fator de correção de EINSTEIN,  $X(D_{65}/\delta)$  (1950)  
(VIEIRA DA SILVA e WILSON-JR., 2005)**

**Tabela VIII.4 – Valores das variáveis hidrossedimentológicas reduzidas**

Experiência	R (m)	U (m/s)	D <sub>35</sub> (mm)	D <sub>65</sub> (mm)	S (cm/km)	$\theta$	R' (m)	D <sub>65</sub> /δ	X	u*' (m/s)	$\theta'$
I <sup>a</sup>	0,229	0,432	0,230	0,312	168,00	0,7445	0,0320	0,6177	1,491	0,0230	0,1411
	0,221	0,469				0,7185	0,0363	0,6579	1,521	0,0245	0,1601
	0,229	0,432			213,00	0,9439	0,0265	0,6329	1,503	0,0235	0,1482
	0,221	0,469				0,9109	0,0300	0,6734	1,531	0,0250	0,1677
	0,229	0,432			255,00	1,1300	0,0230	0,6452	1,512	0,0240	0,1540
	0,221	0,469				1,0905	0,0260	0,6859	1,539	0,0255	0,1740
II <sup>a</sup>	0,219	0,462	0,230	0,312	172,00	0,7289	0,0348	0,6518	1,516	0,0242	0,1571
	0,224	0,473				0,7455	0,0361	0,6638	1,525	0,0247	0,1630
	0,219	0,462			246,50	1,0446	0,0261	0,6757	1,533	0,0251	0,1689
	0,224	0,473				1,0685	0,0271	0,6885	1,541	0,0256	0,1754
	0,219	0,462			295,00	1,2502	0,0227	0,6894	1,541	0,0256	0,1758
	0,224	0,473				1,2787	0,0235	0,7014	1,548	0,0261	0,1820
III <sup>a</sup>	0,200	0,467	0,261	0,357	161,00	0,5380	0,0381	0,7550	1,576	0,0245	0,1402
	0,201	0,460				0,5407	0,0372	0,7460	1,572	0,0242	0,1369
	0,200	0,467			205,36	0,6863	0,0314	0,7740	1,584	0,0252	0,1474
	0,201	0,460				0,6897	0,0306	0,7641	1,580	0,0248	0,1436
	0,200	0,467			232,00	0,7753	0,0285	0,7838	1,588	0,0255	0,1511
	0,201	0,460				0,7792	0,0278	0,7741	1,584	0,0252	0,1474

As variáveis  $\theta$  e  $\theta'$  correspondem às tensões tangenciais normalizadas determinadas por ENGELUND (1966, 1967) *apud* VIEIRA DA SILVA e WILSON-JR. (2005), definidas pelas seguintes expressões:

$$\theta = \frac{\gamma R S}{(\gamma_s - \gamma) D_{65}} \quad (8.2)$$

$$\theta' = \frac{\gamma R' S}{(\gamma_s - \gamma) D_{35}} \quad (8.3)$$

Os valores de  $\theta$  e  $\theta'$  dos regimes selecionados do Córrego Vinte e Um (**Tabela VIII.4**) foram plotados no gráfico de ENGELUND (WILSON-JR. *et al.*, 1980) apresentado na **Figura VIII.3**, a seguir. Eles indicaram que no Córrego Vinte e Um, durante os trabalhos com traçadores radioativos, foi mais provável a existência de rugas no leito do rio do que de dunas. Em outras palavras, durante o período analisado e para os regimes selecionados, o movimento por arraste foi mais superficial e com predominância para o movimento de configurações do tipo rugas.

Este resultado está de acordo com as observações de SIMONS, RICHARDSON e NORDIN (1965) que verificaram que em canais de laboratório, para Números de Froude compreendidos entre 0,15 e 0,30, as configurações de fundo mais frequentes eram do tipo rugas. Como o Número de Froude (**Tabela VIII.3**) variou de 0,288 a 0,333, as configurações estimadas para os regimes observados durante os ensaios com traçadores foram mais próximas dos valores do tipo rugas, do que dunas ( $0,30 < Fr \leq 0,60$ ). Os registros batimétricos das detecções de traçadores mostraram que ambas configurações estiveram presentes no Córrego Vinte e Um, conforme apresentado no recorte de registro batimétrico da **Figura VIII.4**, a seguir.

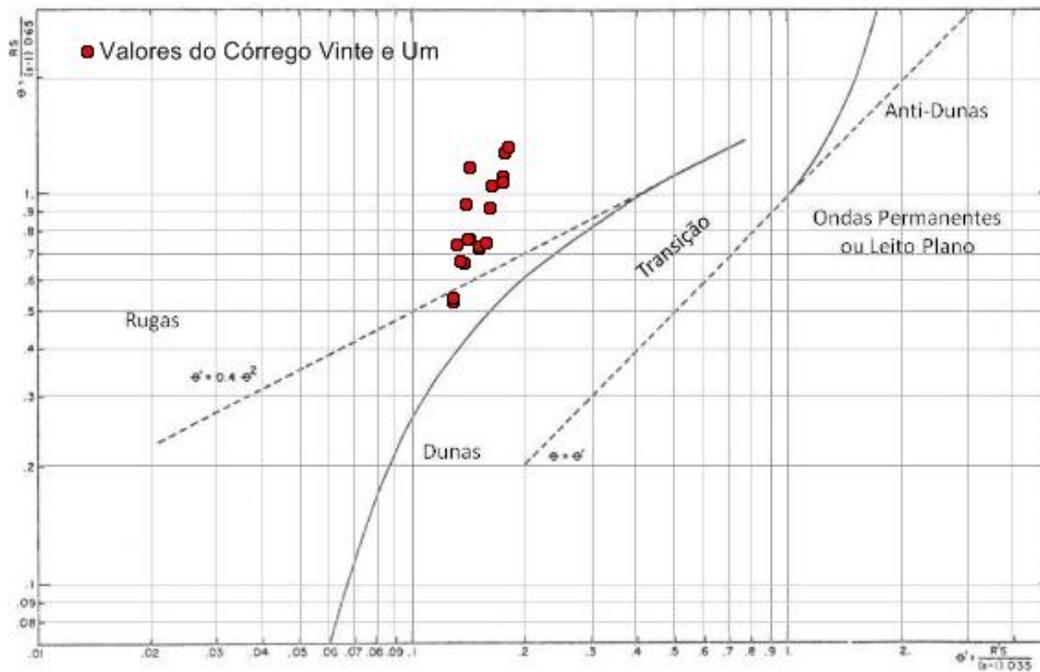


Figura VIII.3 – Previsões das formas de fundo do Córrego Vinte e Um utilizando o Gráfico de ENGELUND (1966, 1967)

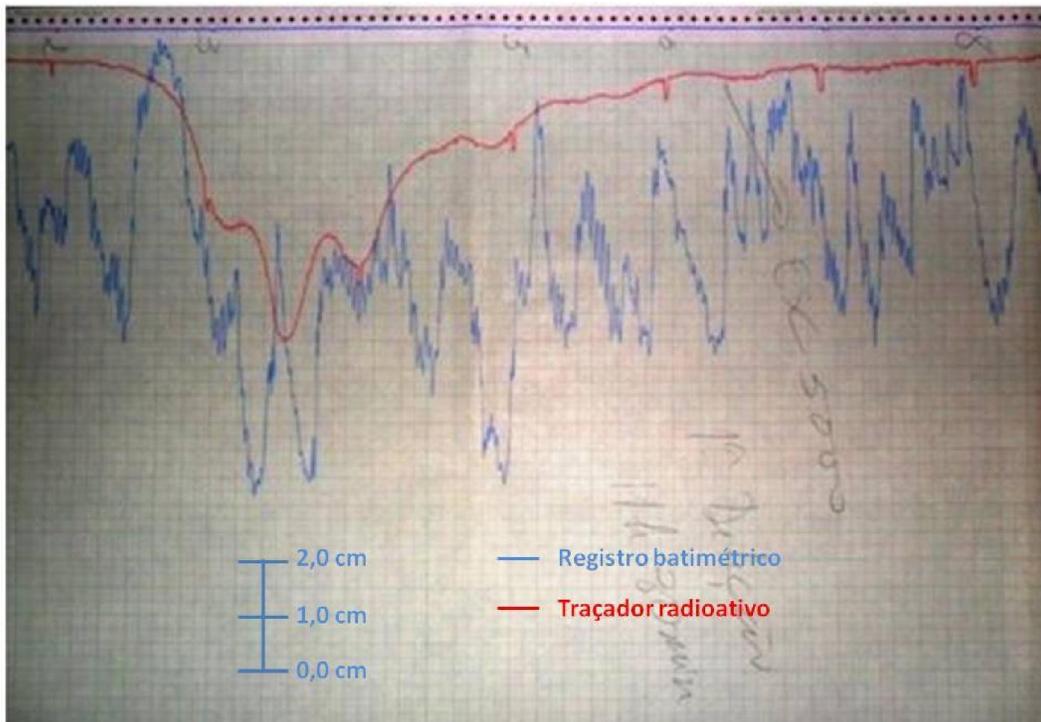


Figura VIII.4 – Exemplo de registro das configurações de fundo do Córrego Vinte e Um

#### VIII.4 ESTIMATIVA DA DESCARGA SÓLIDA POR ARRASTE PELO MÉTODO DE EINSTEIN

Para a estimativa da descarga sólida do material do leito do Córrego Vinte e Um utilizando o Método do EINSTEIN (1950), foram utilizadas as equações das Funções de Intensidade de Corrente,  $\Psi$ , de Transporte  $\Phi$ , e Equação (7.7) que as relaciona entre si e permite obter o valor da Descarga Sólida por Arraste e por unidade de largura,  $q_{bi}$ , para cada classe granulométrica do material do leito.

Dois resultados foram considerados:

- (i) Cálculo da média ponderada das descargas sólidas por unidade de largura de cada classe granulométrica, representada por seu diâmetro médio.
- (ii) Cálculo da descarga sólida por unidade de largura, considerando o diâmetro mediano,  $D_{50}$ , como representativo do material do leito em movimento por arraste.

Os cálculos, equações utilizadas e os resultados obtidos estão apresentados a seguir.

##### VIII.4.1. Cálculo dos Valores da Função Intensidade de Corrente, $\Psi$

Foi utilizada a Equação 8.4, onde o raio hidráulico foi substituído pela sua parcela reduzida,  $R'$ , responsável pelo movimento de sedimentos. A intensidade de corrente,  $\Psi_i$ , obtida para o grão de diâmetro  $D_i$  é dada por:

$$\Psi_i = \frac{(\gamma_s - \gamma) D_i}{\gamma R'S} = \frac{1}{\theta_i} \quad (8.4)$$

onde  $\theta_i$  é a tensão tangencial normalizada de SHIELDS (1936) (Equação 7.9) relativa ao diâmetro médio da classe granulométrica. Os resultados obtidos para as três experiências estão apresentados na **Tabela VIII.5**, a seguir.

### VIII.4.2 Cálculo dos Valores da Função Intensidade de Transporte, $\Phi$

Calcularam-se os valores das função,  $\Phi_i$ , para cada classe granulométrica, utilizando-se a equação resultante do estudo de EINSTEIN (1950), ou seja:

$$\Phi_i = 2,151 e^{-0,391 \Psi_i} \quad (8.5)$$

Os resultados destes cálculos estão apresentados na **Tabela VIII. 6**, a seguir.

### VIII.4.3 Cálculo dos Valores das Descargas Sólidas por Unidade de Largura, $q_{bi}$ , de cada classe granulométrica do material do leito e total, $q_b$

Da Equação (7.11) de EINSTEIN (1950) aplicada a cada classe granulométrica, tem-se:

$$q_{bi} = \left[ \gamma_s \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g D^3} \right] \Phi_i \quad (8.6)$$

com os valores de  $q_{bi}$  são expressos em  $[F L^{-1}T^{-1}]$ , particularmente, em  $[N m^{-1} s^{-1}]$ .

Na **Tabela VIII.7** estão apresentados os valores da descarga sólida linear, em  $N m^{-1}s^{-1}$ , relativos aos diâmetros médios de 20 classes granulométricas que apresentaram a mesma frequência relativa de ocorrência no leito do córrego, ou seja, 0,05 (5%). Para comparação foi apresentada também, a estimativa da descarga sólida por unidade de largura, para os diâmetros medianos ( $D_{50}$ ), do leito.

A Descarga Total por unidade de largura foi calculada pela soma ponderada das  $N = 20$ , descargas sólidas lineares das classes granulométricas, de frequência de ocorrência  $i_b = 0,05$ , ou seja:

$$q_b = \frac{\sum_{i=1}^N i_b q_{bi}}{\sum_{i=1}^N i_b} = 0,05 \sum_{i=1}^N q_{bi} \quad (8.7)$$

**Tabela VIII.5 – Valores da intensidade de corrente,  $\Psi$ , em função do diâmetro do grão de sedimento do Córrego Vinte e Um**

	Primeira Experiência						Segunda Experiência					
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\gamma_s(N/m^3)$	25996,5						25996,5					
$\gamma(N/m^3)$	9786,6						9786,6					
S (cm/km)	168,00		213,00		255,00		172,00		246,50		295,00	
R' (m)	0,0320	0,0363	0,0265	0,0300	0,0230	0,0260	0,0348	0,0361	0,0261	0,0271	0,0227	0,0235
<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Valores de <math>\Psi</math> em Função do Diâmetro do Grão</b>											
0,069	2,126	1,874	2,025	1,789	1,949	1,724	1,909	1,841	1,776	1,711	1,707	1,649
0,150	4,621	4,074	4,402	3,888	4,236	3,747	4,151	4,001	3,862	3,719	3,710	3,584
0,172	5,299	4,672	5,047	4,458	4,857	4,297	4,760	4,588	4,428	4,265	4,254	4,109
0,187	5,761	5,079	5,487	4,847	5,281	4,672	5,175	4,988	4,814	4,637	4,625	4,468
0,200	6,162	5,432	5,869	5,184	5,648	4,997	5,534	5,335	5,149	4,959	4,947	4,778
0,212	6,532	5,758	6,221	5,495	5,987	5,296	5,866	5,655	5,458	5,257	5,244	5,065
0,224	6,901	6,084	6,573	5,806	6,326	5,596	6,199	5,975	5,767	5,554	5,541	5,352
0,236	7,270	6,410	6,930	6,120	6,660	5,900	6,530	6,300	6,080	5,850	5,840	5,640
0,249	7,672	6,763	7,307	6,454	7,032	6,221	6,890	6,642	6,410	6,174	6,159	5,949
0,262	8,072	7,116	7,688	6,791	7,399	6,545	7,250	6,989	6,745	6,496	6,480	6,260
0,276	8,504	7,496	8,099	7,154	7,795	6,895	7,638	7,362	7,106	6,843	6,827	6,594
0,291	8,966	7,904	8,539	7,543	8,218	7,270	8,053	7,763	7,492	7,215	7,198	6,953
0,306	9,428	8,311	8,979	7,932	8,642	7,645	8,468	8,163	7,878	7,587	7,569	7,311
0,321	9,890	8,718	9,420	8,321	9,065	8,019	8,883	8,563	8,264	7,959	7,940	7,669
0,341	10,506	9,262	10,006	8,839	9,630	8,519	9,436	9,096	8,779	8,455	8,434	8,147
0,364	11,215	9,886	10,681	9,435	10,280	9,094	10,073	9,710	9,371	9,025	9,003	8,697
0,391	12,047	10,620	11,474	10,135	11,042	9,768	10,820	10,430	10,066	9,695	9,671	9,342
0,426	13,125	11,570	12,501	11,042	12,031	10,643	11,788	11,364	10,967	10,563	10,537	10,178
0,472	14,542	12,820	13,851	12,235	13,330	11,792	13,061	12,591	12,152	11,703	11,675	11,277
0,670	20,643	18,197	19,661	17,367	18,922	16,738	18,540	17,873	17,249	16,613	16,572	16,008

	Terceira Experiência					
	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII
$\gamma_s(N/m^3)$	26192,7					
$\gamma(N/m^3)$	9786,6					
S (cm/km)	161,00		205,36		232,00	
R' (m)	0,0381	0,0372	0,0314	0,0306	0,0285	0,0278
<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Valores de <math>\Psi</math> em Função do Diâmetro do Grão</b>					
0,072	1,968	2,015	1,872	1,921	1,825	1,871
0,155	4,236	4,338	4,030	4,135	3,930	4,029
0,176	4,810	4,926	4,576	4,695	4,462	4,575
0,196	5,356	5,486	5,095	5,229	4,969	5,094
0,216	5,903	6,046	5,615	5,762	5,476	5,614
0,236	6,450	6,606	6,135	6,296	5,983	6,134
0,253	6,914	7,082	6,577	6,749	6,414	6,576
0,270	7,379	7,557	7,019	7,203	6,846	7,018
0,288	7,871	8,061	7,487	7,683	7,302	7,486
0,305	8,335	8,537	7,929	8,136	7,733	7,928
0,320	8,745	8,957	8,319	8,537	8,113	8,317
0,335	9,155	9,377	8,709	8,937	8,494	8,707
0,349	9,538	9,769	9,073	9,310	8,848	9,071
0,363	9,920	10,160	9,437	9,684	9,203	9,435
0,375	10,248	10,496	9,749	10,004	9,508	9,747
0,391	10,686	10,944	10,165	10,431	9,913	10,163
0,410	11,205	11,476	10,659	10,938	10,395	10,657
0,440	12,025	12,316	11,439	11,738	11,156	11,437
0,500	13,665	13,995	12,999	13,339	12,677	12,996
0,900	24,596	25,191	23,398	24,009	22,818	23,393

**Tabela VIII.6 – Valores da intensidade de transporte,  $\Phi$ , em função do diâmetro do grão de sedimento do Córrego Vinte e Um**

	Primeira Experiência						Segunda Experiência					
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\gamma_s(N/m^3)$	25996,5						25996,5					
$\gamma(N/m^3)$	9786,6						9786,6					
S (cm/km)	168,00		213,00		255,00		172,00		246,50		295,00	
R` (m)	0,0320	0,0363	0,0265	0,0300	0,0230	0,0260	0,0348	0,0361	0,0261	0,0271	0,0227	0,0235
Diâmetro (mm)	Valores de $\phi$ em Função do Diâmetro do Grão											
0,069	0,937	1,034	0,975	1,069	1,004	1,096	1,020	1,047	1,074	1,102	1,104	1,129
0,150	0,353	0,437	0,385	0,470	0,410	0,497	0,424	0,450	0,475	0,502	0,504	0,530
0,172	0,271	0,346	0,299	0,376	0,322	0,401	0,335	0,358	0,381	0,406	0,408	0,431
0,187	0,226	0,295	0,252	0,323	0,273	0,346	0,284	0,306	0,327	0,351	0,353	0,375
0,200	0,193	0,257	0,217	0,283	0,236	0,305	0,247	0,267	0,287	0,309	0,311	0,332
0,212	0,167	0,226	0,189	0,251	0,207	0,271	0,217	0,236	0,255	0,275	0,277	0,297
0,224	0,145	0,199	0,165	0,222	0,181	0,241	0,191	0,208	0,226	0,245	0,246	0,265
0,236	0,125	0,175	0,143	0,197	0,159	0,215	0,167	0,183	0,200	0,218	0,219	0,237
0,249	0,107	0,153	0,124	0,172	0,138	0,189	0,145	0,160	0,175	0,192	0,194	0,210
0,262	0,092	0,133	0,106	0,151	0,119	0,166	0,126	0,140	0,154	0,170	0,171	0,186
0,276	0,077	0,115	0,091	0,131	0,102	0,145	0,109	0,121	0,134	0,148	0,149	0,163
0,291	0,065	0,098	0,076	0,113	0,087	0,125	0,092	0,103	0,115	0,128	0,129	0,142
0,306	0,054	0,083	0,064	0,097	0,073	0,108	0,078	0,088	0,099	0,111	0,112	0,123
0,321	0,045	0,071	0,054	0,083	0,062	0,094	0,067	0,076	0,085	0,096	0,096	0,107
0,341	0,035	0,058	0,043	0,068	0,050	0,077	0,054	0,061	0,069	0,079	0,080	0,089
0,364	0,027	0,045	0,033	0,054	0,039	0,061	0,042	0,048	0,055	0,063	0,064	0,072
0,391	0,019	0,034	0,024	0,041	0,029	0,047	0,031	0,036	0,042	0,049	0,049	0,056
0,426	0,013	0,023	0,016	0,029	0,019	0,034	0,021	0,025	0,030	0,035	0,035	0,040
0,472	0,007	0,014	0,010	0,018	0,012	0,021	0,013	0,016	0,019	0,022	0,022	0,026
0,670	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,003	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,004

	Terceira Experiência					
	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII
$\gamma_s(N/m^3)$	26192,7					
$\gamma(N/m^3)$	9786,6					
S (cm/km)	161,00		205,36		232,00	
R` (m)	0,0381	0,0372	0,0314	0,0306	0,0285	0,0278
Diâmetro (mm)	Valores de $\phi$ em Função do Diâmetro do Grão					
0,072	0,997	0,978	1,035	1,015	1,054	1,035
0,155	0,411	0,394	0,445	0,427	0,463	0,445
0,176	0,328	0,313	0,359	0,343	0,376	0,360
0,196	0,265	0,252	0,293	0,278	0,308	0,293
0,216	0,214	0,202	0,239	0,226	0,253	0,239
0,236	0,173	0,163	0,195	0,183	0,207	0,195
0,253	0,144	0,135	0,164	0,154	0,175	0,164
0,270	0,120	0,112	0,138	0,129	0,148	0,138
0,288	0,099	0,092	0,115	0,107	0,124	0,115
0,305	0,083	0,076	0,097	0,089	0,105	0,097
0,320	0,070	0,065	0,083	0,076	0,090	0,083
0,335	0,060	0,055	0,071	0,065	0,078	0,071
0,349	0,052	0,047	0,062	0,056	0,068	0,062
0,363	0,044	0,040	0,054	0,049	0,059	0,054
0,375	0,039	0,036	0,048	0,043	0,052	0,048
0,391	0,033	0,030	0,040	0,036	0,045	0,040
0,410	0,027	0,024	0,033	0,030	0,037	0,033
0,440	0,020	0,017	0,025	0,022	0,027	0,025
0,500	0,010	0,009	0,013	0,012	0,015	0,013
0,900	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002	0,0003	0,0002

Tabela VIII.7 – Valores da descarga sólida por unidade de largura,  $q_b$ , em função do diâmetro do grão de sedimento do Córrego Vinte e Um

	Primeira Experiência						Segunda Experiência					
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\gamma_s(N/m^3)$	25996,5						25996,5					
$\gamma(N/m^3)$	9786,6						9786,6					
S (cm/km)	168,00		213,00		255,00		172,00		246,50		295,00	
R' (m)	0,0320	0,0363	0,0265	0,0300	0,0230	0,0260	0,0348	0,0361	0,0261	0,0271	0,0227	0,0235
Diâmetro (mm)	Valores de $q_b$ em Função do Diâmetro do Grão											
0,069	0,056	0,062	0,059	0,064	0,060	0,066	0,061	0,063	0,065	0,066	0,066	0,068
0,150	0,068	0,084	0,074	0,091	0,079	0,096	0,082	0,087	0,091	0,097	0,097	0,102
0,172	0,064	0,082	0,071	0,089	0,076	0,095	0,079	0,085	0,090	0,096	0,096	0,102
0,187	0,061	0,079	0,067	0,087	0,073	0,093	0,076	0,082	0,088	0,094	0,094	0,100
0,200	0,057	0,076	0,064	0,084	0,070	0,090	0,073	0,079	0,085	0,092	0,092	0,098
0,212	0,054	0,073	0,061	0,081	0,067	0,088	0,070	0,076	0,082	0,089	0,090	0,096
0,224	0,051	0,070	0,058	0,078	0,064	0,085	0,067	0,073	0,079	0,086	0,087	0,093
0,236	0,048	0,067	0,054	0,075	0,060	0,082	0,064	0,070	0,076	0,083	0,083	0,090
0,249	0,044	0,063	0,051	0,071	0,057	0,078	0,060	0,066	0,072	0,079	0,080	0,087
0,262	0,041	0,059	0,047	0,067	0,053	0,074	0,056	0,062	0,068	0,075	0,076	0,083
0,276	0,037	0,055	0,044	0,063	0,049	0,070	0,052	0,058	0,064	0,071	0,072	0,078
0,291	0,034	0,051	0,040	0,059	0,045	0,065	0,048	0,054	0,060	0,067	0,067	0,074
0,306	0,030	0,047	0,036	0,054	0,041	0,061	0,044	0,050	0,055	0,062	0,063	0,069
0,321	0,027	0,043	0,033	0,050	0,037	0,056	0,040	0,046	0,051	0,058	0,058	0,065
0,341	0,023	0,038	0,028	0,045	0,033	0,051	0,035	0,040	0,046	0,052	0,052	0,059
0,364	0,020	0,033	0,024	0,039	0,028	0,045	0,030	0,035	0,040	0,046	0,046	0,052
0,391	0,016	0,027	0,020	0,033	0,023	0,038	0,025	0,030	0,034	0,039	0,040	0,045
0,426	0,012	0,021	0,015	0,026	0,018	0,031	0,020	0,023	0,027	0,032	0,032	0,037
0,472	0,008	0,015	0,010	0,019	0,013	0,023	0,014	0,017	0,020	0,024	0,024	0,028
0,670	0,001	0,003	0,002	0,004	0,002	0,006	0,003	0,004	0,005	0,006	0,006	0,007
$q_b (N/m.s)$ $=0,05 \Sigma q_{bi}$	0,0376	0,0525	0,0429	0,0590	0,0474	0,0645	0,0500	0,0549	0,0600	0,0657	0,0661	0,0717

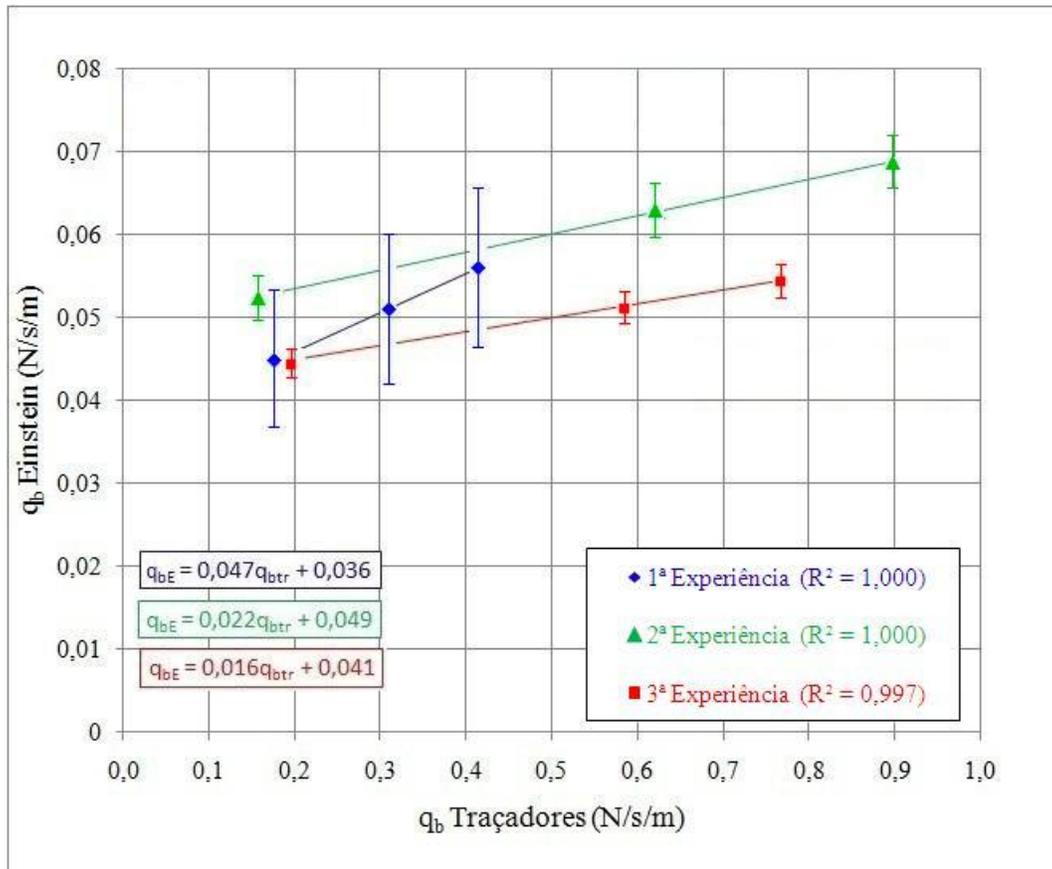
	Terceira Experiência					
	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII
$\gamma_s(N/m^3)$	26192,7					
$\gamma(N/m^3)$	9786,6					
S (cm/km)	161,00		205,36		232,00	
R' (m)	0,0381	0,0372	0,0314	0,0306	0,0285	0,0278
Diâmetro (mm)	Valores de $q_b$ em Função do Diâmetro do Grão					
0,072	0,065	0,063	0,067	0,066	0,068	0,067
0,155	0,084	0,081	0,091	0,088	0,095	0,091
0,176	0,081	0,078	0,089	0,085	0,093	0,089
0,196	0,077	0,073	0,086	0,081	0,090	0,086
0,216	0,072	0,068	0,081	0,076	0,085	0,081
0,236	0,067	0,063	0,075	0,071	0,080	0,075
0,253	0,062	0,058	0,070	0,066	0,075	0,070
0,270	0,057	0,053	0,065	0,061	0,070	0,065
0,288	0,051	0,048	0,060	0,055	0,064	0,060
0,305	0,047	0,043	0,055	0,051	0,059	0,055
0,320	0,043	0,039	0,051	0,046	0,055	0,051
0,335	0,039	0,036	0,047	0,043	0,051	0,047
0,349	0,036	0,033	0,043	0,039	0,047	0,043
0,363	0,033	0,030	0,039	0,036	0,043	0,039
0,375	0,030	0,027	0,037	0,033	0,040	0,037
0,391	0,027	0,024	0,033	0,030	0,037	0,033
0,410	0,024	0,021	0,029	0,026	0,033	0,029
0,440	0,019	0,017	0,024	0,021	0,027	0,024
0,500	0,012	0,011	0,016	0,014	0,018	0,016
0,900	0,0004	0,0003	0,001	0,001	0,001	0,001
$q_b (N/m.s)$ $=0,05 \Sigma q_{bi}$	0,0463	0,0433	0,0529	0,0494	0,0565	0,0529

#### **VIII.4.4 Comparação dos resultados obtidos pelo método de Einstein e medidos com traçadores radioativos**

Durante as experiências com traçadores radioativos foram realizadas medições de vazão líquida na seção de medidas, cuja localização está apresentada na Figura III.2. Para cada experiência com traçador, realizaram-se duas medições sucessivas de vazão líquida, cujos resultados estão apresentados nas Tabelas IV.3 e VIII.1, e foram utilizados para a descrição dos regimes hidrossedimentológicos do Córrego Vinte e Um. Eles mostram que as variações durante as medições de vazão líquida foram pequenas, dentro da ordem de precisão das medições com molinete hidrométrico, sendo a maior variação de apenas 5,04 % durante a primeira experiência. Nos outros ensaios, as variações foram de 2,40 e 1,50 %, respectivamente.

Desta forma, compararam-se os resultados obtidos com traçadores radioativos com a média dos resultados estimados pelos métodos de EINSTEIN (1950), VUKMIROVIC' e VUKOTIC' (1981), VAN RIJN (1984), e pela Equação das Dunas e Rugas (SIMONS, RICHARDSON e NORDIN, 1965), relativos às variáveis hidrodinâmicas determinadas durante as medições sucessivas de vazão líquida.

A **Figura VIII.5** mostra o ajuste dos resultados do Método de EINSTEIN (1950) com as medições efetuadas com traçadores radioativos. Os resultados estimados com esse método foram inferiores aos medidos com traçadores radioativos. Resultados semelhantes aos obtidos no Córrego Vinte e Um, decorrentes da aplicação do Método de EINSTEIN (1950), foram observados, também, no Canal de São Gonçalo, nas proximidades de Pelotas, RS (WILSON-JR. e VUKMIROVIC', 1973), no Rio Ivaí, no trecho de Novo Porto Taquara (WILSON-JR., RODRIGUES e SOARES, 1980) e no Ribeirão do Rato (DA HORA, 1996). Os ajustes dos resultados dos outros métodos serão apresentados a seguir.



**Figura VIII.5 – Comparação das estimativas da descarga sólida por unidade de largura obtidas pelo Método de Einstein, com as medições de traçadores radioativos**

### VIII.5 ESTIMATIVA DA DESCARGA SÓLIDA POR ARRASTE PELO MÉTODO DE VUKMIROVIC' E VUKOTIC'

A Equação (7.10) original de VUKMIROVIC'e VUKOTIC' (1981) foi desenvolvida para os Rios Sava e Savinja, na Iugoslávia. NERY (2002) mostrou que a equação, como as demais expressões do movimento de sedimentos, não é universal, e deve ser ajustada aos trechos dos escoamentos estudados. Desta forma, considerou-se a seguinte expressão geral destes autores:

$$\Phi' = a (\theta' - \theta'_0)^b \quad (8.8)$$

onde,  $\Phi'$  representa a Função de Intensidade de Transporte, definida pela Equação (7.5) de EINSTEIN (1950) em função do valor reduzido do raio hidráulico,  $R'$ .  $\theta'$  e  $\theta'_0$  são as tensões tangenciais normalizadas reduzidas, do escoamento e relativa ao movimento incipiente do grão, respectivamente, e  $\theta'$  é definida pela expressão adaptada de

SHIELDS (1936) e de ENGELUND (1966) (WILSON-JR., RODRIGUES e SANTOS, 1980, NERY, 2002):

$$\theta' = \frac{\gamma R' S}{(\gamma_s - \gamma) D_{50}} = \frac{1}{\Psi'} \quad (8.9)$$

onde  $D_{50}$  é igual ao diâmetro mediano do sedimento do leito, marcado ou simulado com traçador radioativo, e  $\Psi'$  representa a Intensidade da Corrente reduzida, obtida a partir do valor do raio hidráulico reduzido  $R'$ . Os parâmetros  $a$  e  $b$  correspondem aos parâmetros de proporcionalidade da equação. Cabe destacar que os valores de  $\theta'$  da expressão de VUKMIROVIC' e VUKOTIC' (1981) são obtidos da Equação (8.9) em função do  $D_{50}$ , por isto, são inferiores aos obtidos com  $D_{65}$  por EINSTEIN (1950).

Os coeficientes  $a$  e  $\theta_0'$  foram determinados para a seção do rio Savinja, obtendo-se a equação usada por VUKMIROVIC' e VUKOTIC' (1981):

$$\Phi' = 40(\theta' - 0,146)^3 \quad (8.10)$$

Entretanto, a equação que melhor se ajustou aos dados obtidos com traçador radioativo no Córrego Horácio, em Barraco de Zinco (NERY, 2002), sub-bacia hidrográfica vizinha à do Córrego Vinte e Um, com solo também do tipo arenito, mas com ocupação agrícola predominante, apresentou os seguintes valores para  $a$  e  $\theta_0'$ :

$$\Phi' = 1,296(\theta' - 0,080)^2 \quad (8.11)$$

Na **Tabela VIII.8** apresentam-se os valores das variáveis reduzidas utilizadas no cálculo da descarga sólida por unidade de largura, através da Equação Geral (8.8) de VUKMIROVIC' e VUKOTIC' (1981). Os valores dos pesos específicos dos sedimentos do leito do Córrego Vinte e Um foram iguais a 25.996,5 e 26.192,7 N/m<sup>3</sup> para a areia marcada com Au<sup>198</sup> nos dois primeiros ensaios, e para o vidro moído contendo Ir<sup>192</sup> no terceiro ensaio, respectivamente. O peso específico da água foi igual a 9.786,6 N/m<sup>3</sup>.

**Tabela VIII.8 – Valores reduzidos da função intensidade de transporte utilizados no cálculo da descarga sólida por unidade de largura pelo método de VUKMIROVIC’ e VUKOTIC’ (1981)**

Experiência	Regime	$q_b$ (N/m.s)	R' (m)	$D_{50}$ (mm)	S (cm/km)	$\theta'$	$\theta'$ médio	$\Phi'^1$	$\Phi'^{2/3}$	$\Phi'^{1/2}$	$\Phi'^{1/3}$
I <sup>a</sup> (12/10/1974)	I	0,0576	0,0320	0,269	168,00	0,1207	0,1288	0,1246	0,2495	0,3530	0,4995
	II		0,0363			0,1369					
	III	0,0978	0,0265		213,00	0,1267	0,1351	0,2115	0,3550	0,4599	0,5958
	IV		0,0300			0,1434					
	V	0,1315	0,0230		255,00	0,1316	0,1402	0,2844	0,4325	0,5333	0,6576
	VI		0,0260			0,1488					
II <sup>a</sup> (16/10/1974)	VII	0,0510	0,0348	0,269	172,00	0,1343	0,1369	0,1101	0,2297	0,3318	0,4793
	VIII		0,0361			0,1394					
	IX	0,2029	0,0261		246,50	0,1444	0,1472	0,4388	0,2906	0,6624	0,7599
	X		0,0271			0,1499					
	XI	0,2936	0,0227		295,00	0,1503	0,1530	0,6349	0,7387	0,7968	0,8595
	XII		0,0235			0,1556					
III <sup>a</sup> (21/10/1974)	XIII	0,0530	0,0381	0,312	161,00	0,1173	0,1159	0,0905	0,2016	0,3008	0,4490
	XIV		0,0372			0,1145					
	XV	0,1705	0,0314		205,36	0,1233	0,1217	0,2913	0,4394	0,5397	0,6629
	XVI		0,0306			0,1201					
	XVII	0,2240	0,0285		232,00	0,1264	0,1249	0,3827	0,5271	0,6186	0,7260
	XVIII		0,0278			0,1233					

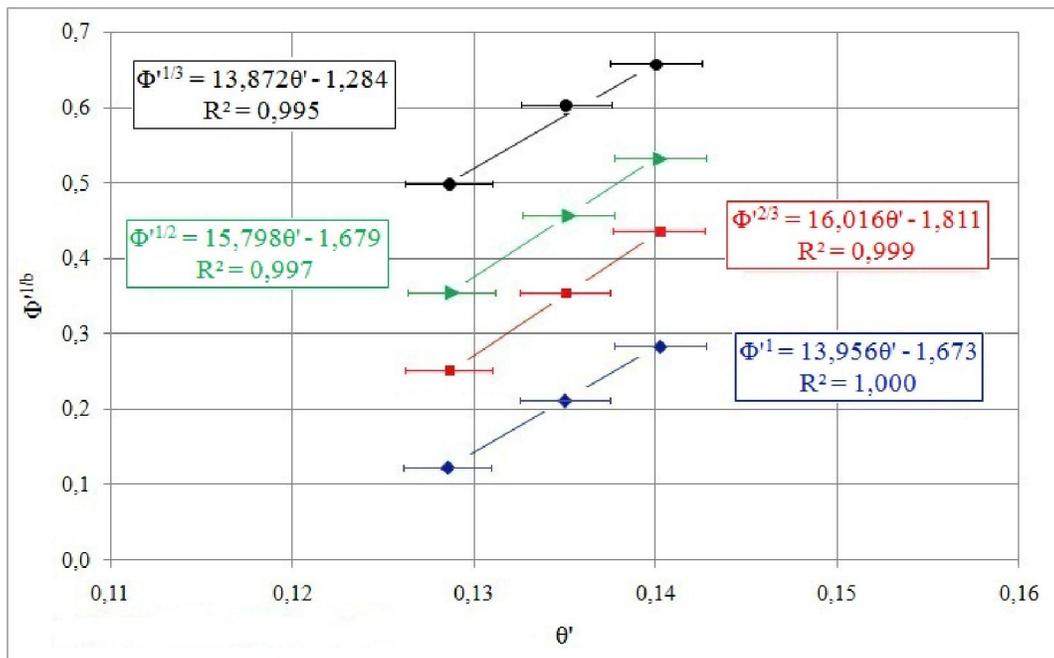
A Equação (8.8) também pode se escrita da seguinte forma:

$$\Phi'^{1/b} = A (\theta' - \theta'_0) \quad (8.12)$$

sendo:

$$A = a^{1/b} \quad (8.13)$$

Para o cálculo dos valores de **a**,  $\theta_0$  e do expoente **b** que melhor se ajustaram aos dados experimentais do Córrego Vinte e Um, em Fazenda Vitória, foram desenhadas as curvas de  $\Phi'^{1/b}$ , em função dos valores médios da Tensão Normalizada Reduzida  $\theta'$ , para valores de **b** = 1; 1,5; 2 e 3, conforme apresentado nas **Figuras VIII.6** a **VIII.8**, a seguir, calculados para os regimes selecionados por experiência com traçador radioativo.



**Figura VIII.6 – Curvas de  $\Phi'^{1/b}$  em função de  $\theta'$  para os regimes hidrossedimentométricos observados durante a primeira experiência com  $Au^{198}$ .**

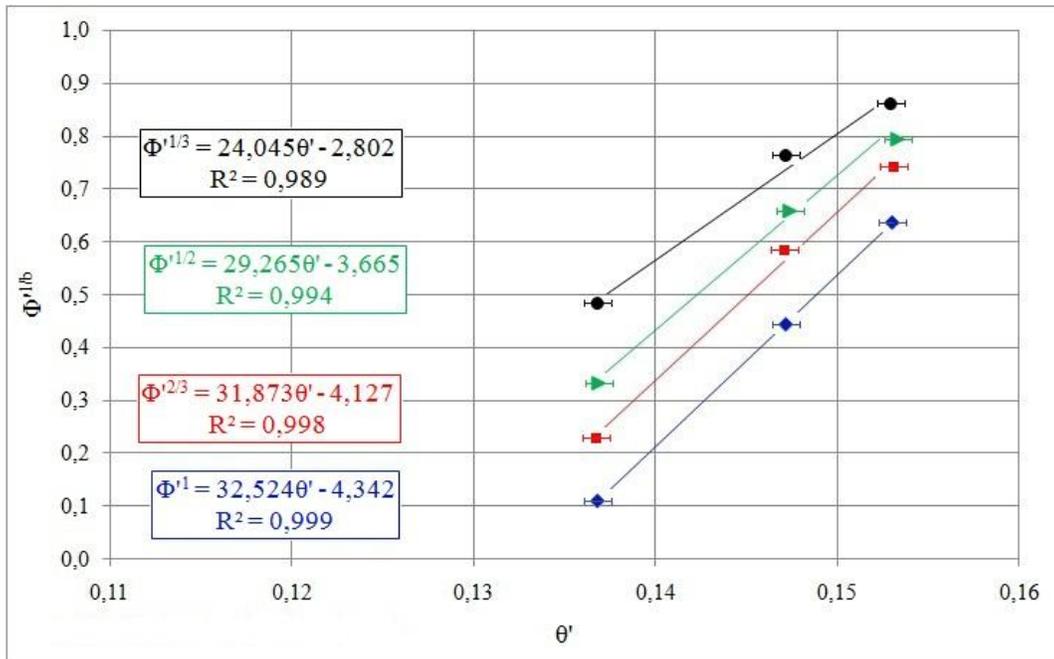


Figura VIII.7 – Curvas de  $\Phi^{1/b}$  em função de  $\theta'$  para os regimes hidrossedimentométricos observados durante a segunda experiência com Au<sup>198</sup>

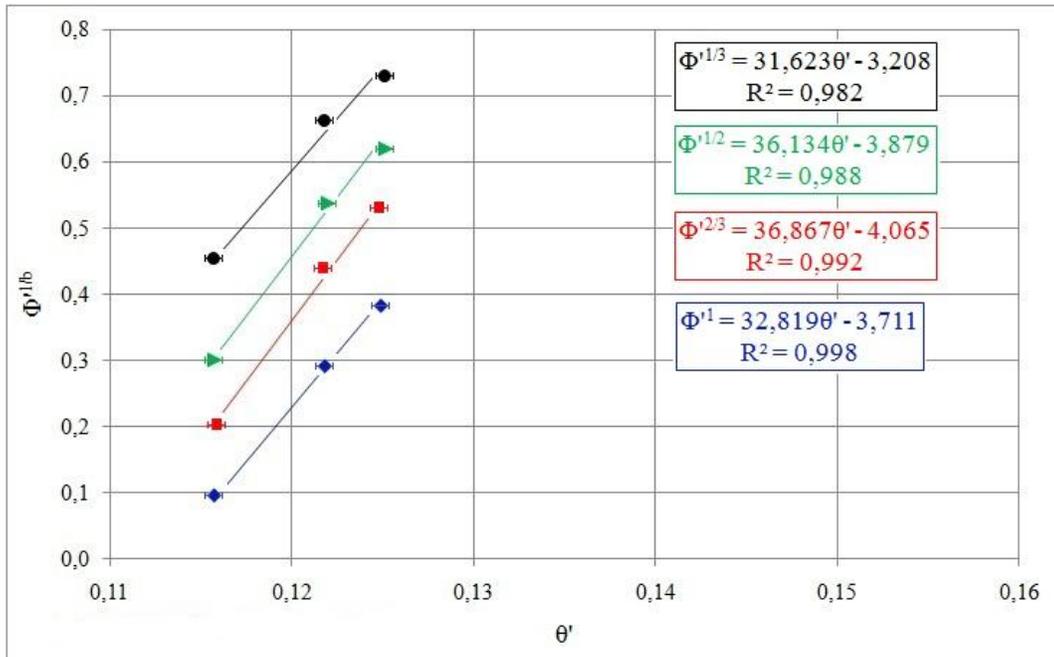


Figura VIII.8 – Curvas de  $\Phi^{1/b}$  em função de  $\theta'$  para os regimes hidrossedimentométricos observados durante a experiência com Ir<sup>192</sup>

Os ajustes das curvas teóricas aos dados experimentais das medições de campo, pelo método dos mínimos quadrados, para os regimes selecionados em cada experiência com traçador radioativo, foram muito bons. Os coeficientes de determinação  $R^2$  foram superiores a 0,980. Para todos os regimes, determinaram-se os valores de  $A$ ,  $a$  e de  $\theta_0$ , do ajuste da Equação geral (8.8) aos dados das medições hidrossedimentométricas, para valores de  $b = 1; 1,5; 2$  e  $3$ . Os valores dos parâmetros ajustados aos dados experimentais estão apresentados nas etiquetas das **Figuras VIII.6 a VIII.8** e resumidos na **Tabela VIII.9**, a seguir.

**Tabela VIII.9 – Valores usados para o ajuste da Equação de Vukmirovic' e Vukotic' aos dados hidrossedimentométricos do Córrego Vinte e Um**

b	$A = a^{1/b}$	$\Phi^{1/b} = A (\theta' - \theta_0)'$	a	$\Phi' = a (\theta' - \theta_0)'^b$	$R^2$
Primeira experiência: Au <sup>198</sup>					
1	13,956	13,956 $\theta' - 1,673$	13,956	$\Phi' = a (\theta' - 0,120)$	1,000
1,5	16,016	16,016 $\theta' - 1,811$	64,096	$\Phi' = a (\theta' - 0,113)^{3/2}$	0,999
2	15,798	15,798 $\theta' - 1,679$	249,577	$\Phi' = a (\theta' - 0,106)^2$	0,997
3	13,872	13,872 $\theta' - 1,284$	2.669,422	$\Phi' = a (\theta' - 0,093)^3$	0,995
Segunda experiência: Au <sup>198</sup>					
1	32,524	32,524 $\theta' - 4,342$	32,524	$\Phi' = a (\theta' - 0,134)$	0,999
1,5	31,873	31,873 $\theta' - 4,127$	10,053	$\Phi' = a (\theta' - 0,129)^{3/2}$	0,998
2	29,265	29,265 $\theta' - 3,665$	856,440	$\Phi' = a (\theta' - 0,125)^2$	0,994
3	24,045	24,045 $\theta' - 2,802$	13.901,906	$\Phi' = a (\theta' - 0,117)^3$	0,989
Terceira experiência: Ir <sup>192</sup>					
1	32,819	32,819 $\theta' - 3,711$	32,819	$\Phi' = a (\theta' - 0,1131)$	0,998
1,5	36,867	36,867 $\theta' - 4,065$	11,077	$\Phi' = a (\theta' - 0,110)^{3/2}$	0,992
2	36,134	36,134 $\theta' - 3,879$	1.305,666	$\Phi' = a (\theta' - 0,107)^2$	0,988
3	31,623	31,623 $\theta' - 3,208$	31.623,447	$\Phi' = a (\theta' - 0,101)^3$	0,982

Como os valores dos coeficientes de determinação  $R^2$  foram muito próximos de 1,000 e uns dos outros, optou-se por utilizar o coeficiente  $b = 3$ , ou seja, o mesmo utilizado no trabalho original de VUKMIROVIC' e VUKOTIC' (1981) nos rios iugoslavos. Na **Tabela VIII.10** a seguir, são apresentados os resultados da descarga sólida por arraste e por unidade de largura, obtidos da equação proposta por estes autores, ajustada ao trecho denominado Barraco de Zinco, do Córrego Vinte e Um.

Os desvios observados entre os valores médios da descarga sólida por unidade de largura calculados pela fórmula ajustada de VUKMIROVIC' e VUKOTIC' (1981) e os

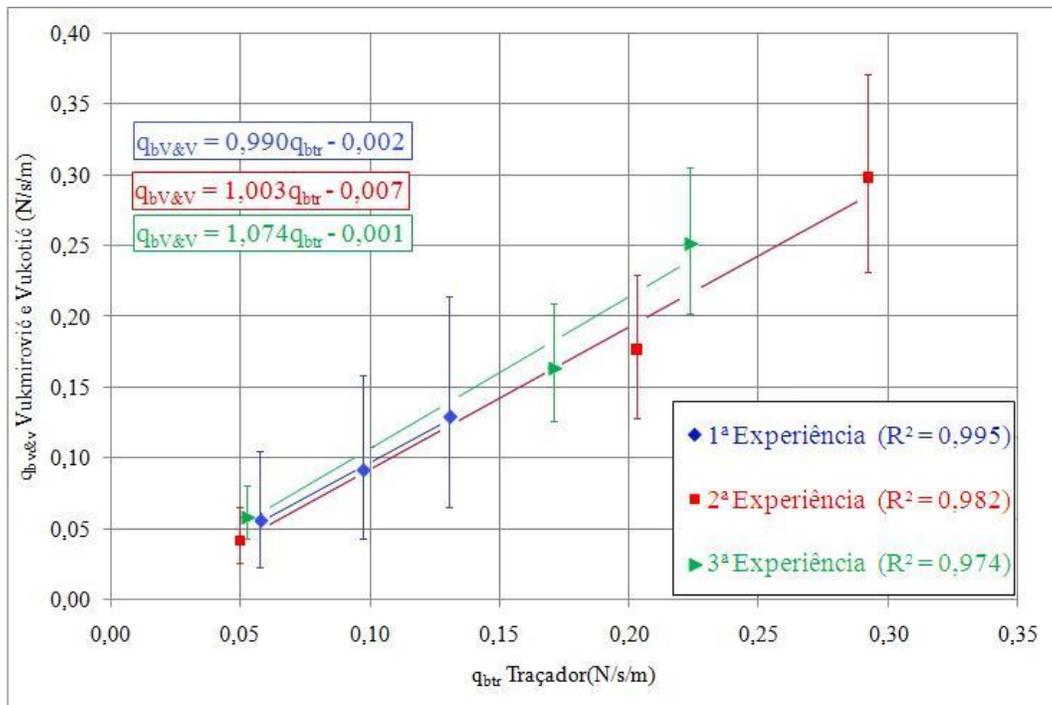
resultados dos ensaios com traçadores radioativos foram inferiores a 16,00 %, como se pode ver na última coluna da **Tabela VIII.10**, embora os desvios absolutos entre as estimativas de cada regime proposto e os traçadores, tenham chegado a 84,13 %, como indicado pelas barras de variação da **Figura VIII.9**, apresentada a seguir.

**Tabela VIII.10 – Descargas sólidas por unidade de largura estimadas pelo método de VUKMIROVIC' e VUKOTIC' (1981)**

Experiência	Regime	$q_{\text{traçador}}$ (N/m.s)	$R'$ (m)	$\theta'$	$\Phi' = a (\theta' - \theta_0')^3$	$\Phi'$	$q_{bV\&V}$ (N/m.s)	$\sigma_{\text{médio}}$ (%)
I <sup>a</sup> (12/10/1974)	I	0,0576	0,0320	0,1207	$\Phi' = a (\theta' - 0,093)^3$  $a = 2.669,422$	0,0772	0,0357	1,56
				0,1288		0,1225	0,0567	
	II	0,0978	0,0363	0,1369	$\gamma_s = 25.996,5 \text{ N/m}^3$  $\gamma = 9.786,6 \text{ N/m}^3$	0,2258	0,1044	5,83
	III		0,0265	0,1267		0,1022	0,0473	
	IV	0,1315	0,0300	0,1434	$D_{50} = 0,269 \text{ mm}$  $q_b = 0,4625 \Phi'$	0,3418	0,1581	1,29
	V		0,0230	0,1316		0,1535	0,0710	
	VI		0,0260	0,1488	0,2807	0,1298	0,4638	0,2145
	II <sup>a</sup> (16/10/1974)	VII	0,0510	0,0348	0,1343	$\Phi' = a (\theta' - 0,117)^3$  $a = 13.901,906$	0,0720	0,0333
				0,1369	0,1096		0,0507	
VIII		0,2029	0,0361	0,1394	$\gamma_s = 25.996,5 \text{ N/m}^3$  $\gamma = 9.786,6 \text{ N/m}^3$	0,1562	0,0722	12,71
IX			0,0261	0,1444		0,2860	0,1323	
X		0,2936	0,0271	0,1499	$D_{50} = 0,269 \text{ mm}$  $q_b = 0,4625 \Phi'$	0,3829	0,1771	2,18
XI			0,0227	0,1503		0,4951	0,2290	
XII			0,0235	0,1556	0,5133	0,2374	0,6486	0,3000
III <sup>a</sup> (21/10/1974)		XIII	0,0530	0,0381	0,1173	$\Phi' = a (\theta' - 0,101)^3$  $a = 31.623,447$	0,1370	0,0802
				0,1159	0,1046		0,0612	
	XIV	0,1705	0,0372	0,1145	$\gamma_s = 26.192,7 \text{ N/m}^3$  $\gamma = 9.786,6 \text{ N/m}^3$	0,0778	0,0455	3,70
	XV		0,0314	0,1233		0,3507	0,2053	
	XVI	0,2240	0,0306	0,1201	$D_{50} = 0,312 \text{ mm}$  $q_b = 0,5854 \Phi'$	0,2805	0,1642	12,81
	XVII		0,0285	0,1264		0,2203	0,1290	
	XVIII		0,0278	0,1233	0,5182	0,3034	0,4317	0,2527
					0,3507	0,2053		

Os resultados obtidos pelo método de VUKMIROVIC' e VUKOTIC' (1981) ilustram bem a sensibilidade do processo sedimentológico, às variações hidrossedimentológicas do trecho estudado. Durante o curto período da Campanha de Medições Intensivas (12/10/1974 a 21/10/1974) foram caracterizados 18 regimes hidrodinâmicos

e sedimentológicos, em função das variações observadas durante as 3 experiências com traçadores radioativos. Para cada experiência consideraram-se: 3 pares de valores de declividade (S), 2 pares de valores do raio hidráulico reduzido (R') e da velocidade média (U) que descreveram qualitativamente o comportamento hidrossedimentométrico do Córrego Vinte e Um, neste período de apenas 10 dias. As calibrações efetuadas para os regimes analisados, mostram que no caso do Córrego Vinte e Um, serão necessários novas campanhas detalhadas de medidas intensivas, para validações das fórmulas utilizadas, tendo em vista a resposta rápida (cada experiência se estendeu por um período médio de 17 horas, aproximadamente) do movimento sedimentológico, às variações hidrodinâmicas observadas durante as experiências.



**Figura VIII.9 – Comparação das estimativas da descarga sólida por unidade de largura obtidas pelo Método de Vukmirović e Vukotić, com as medições de traçadores radioativos**

## VIII.6 ESTIMATIVA DA DESCARGA SÓLIDA POR ARRASTE PELO MÉTODO DE VAN RIJN

O método desenvolvido por VAN RIJN (1984) foi utilizado para os cálculos da descarga sólida linear por arraste, por unidade de largura, através da seção transversal de medidas do Córrego Vinte e Um. As equações utilizadas foram apresentadas no Capítulo VII, e a sequência e os resultados dos cálculos estão resumidos na **Tabela VIII.11**, apresentada a seguir. Foi utilizado o mesmo banco de dados hidrossedimentométricos e morfológicos preparado nos capítulos anteriores, obtido durante as três experiências realizadas com traçadores radioativos. As dez primeiras colunas da **Tabela VIII.11** apresentam os valores dessas variáveis, para os regimes hidrossedimentológicos de cada experiência, descritos no Item VIII.2, precedente.

As dez primeiras colunas da **Tabela VIII.11** correspondem aos valores das variáveis de entrada do método de cálculo do Método de Van Rijn, as demais seguem a sequência, praticamente na ordem inversa, da descrição apresentada no Item VII.4.

Nas duas últimas colunas da **Tabela VIII.11** estão apresentados os valores das descargas sólidas por unidade de largura, obtidos pelos métodos de Van Rijn e do Balanço das Taxas de Contagem, com utilização de traçadores radioativos. Consta-se que os valores obtidos por este método foram cerca de 2 a 7 vezes superiores aos valores medidos com traçadores radioativos.

As relações entre os resultados obtidos com o Método de Van Rijn e medidos com traçadores radioativos estão apresentados na **Figura VIII.10**, a seguir, mostrando que os resultados são proporcionais às medições de campo, o que significa que o método pode ser calibrado para representar o movimento sólido por arraste do Córrego Vinte e Um, no trecho de Fazenda Vitória.

**Tabela VIII.11 – Estimativas das descargas sólidas por unidade de largura pelo método de VAN RIJN (1984)**

Expe- riências	Regi- mes	R (m)	U (m/s)	Re	S (cm/km)	B (m)	h (m)	u <sub>s</sub> (m/s)	Dados Complementares	f	Re/f (× 10 <sup>-5</sup> )	f <sub>w</sub>	f - f <sub>w</sub>	f <sub>b</sub>	R' (m)	R <sub>b</sub> ' (m)	C' (m <sup>1/2</sup> /s)	u' <sub>s</sub> (m/s)	T <sub>VR</sub>	Φ	Q <sub>b</sub> (N/m.s)	Q <sub>b</sub> médio (N/m.s)	Q <sub>b</sub> Traç. (N/m.s)
I <sup>a</sup> 12/10/74	I	0,229	0,432	98.928	168,00	4,00	0,241	0,0614	$\gamma_s=25.996,5 \text{ N/m}^3$ $\gamma=9.786,6 \text{ N/m}^3$	0,162	6,107	0,0268	0,1352	0,1783	0,0320	0,0352	45,022	0,0301	4,0457	0,5609	0,2594	0,3076	0,0576
	II	0,221	0,469	103.649			0,234	0,0604		0,133	7,793	0,0256	0,1074	0,1456	0,0363	0,0397	45,962	0,0320	4,7028	0,7694	0,3558		
	III	0,229	0,432	98.928	213,00		0,241	0,0692	$D_{50} = 0,269 \text{ mm}$ $D_{90} = 0,444 \text{ mm}$ $D_* = 6,813$	0,205	4,826	0,0286	0,1764	0,2263	0,0265	0,0293	43,588	0,0310	4,3520	0,6538	0,3023	0,3590	0,0978
	IV	0,221	0,469	103.649			0,234	0,0680		0,168	6,170	0,0267	0,1413	0,1847	0,0300	0,0330	44,517	0,0330	5,0648	0,8991	0,4157		
	V	0,229	0,432	98.928	255,00		0,241	0,0757	$\theta_c = 0,0410$ $u_{*c} = 0,0134 \text{ m/s}$	0,246	4,021	0,0297	0,2163	0,2721	0,0230	0,0254	42,471	0,0319	4,6672	0,7572	0,3501	0,4090	0,1315
	VI	0,221	0,469	103.649			0,234	0,0744		0,201	5,157	0,0281	0,1729	0,2212	0,0260	0,0286	43,399	0,0338	5,3624	1,0136	0,4687		
II <sup>a</sup> 16/10/74	VII	0,219	0,462	101.178	172,00	4,00	0,231	0,0608	$\gamma_s=25.996,5 \text{ N/m}^3$ $\gamma=9.786,6 \text{ N/m}^3$	0,139	7,279	0,0259	0,1131	0,1521	0,0348	0,0381	45,641	0,0317	4,5964	0,7333	0,3391	0,3532	0,0510
	VIII	0,224	0,473	105.952		3,85	0,229	0,0615		0,135	7,848	0,0256	0,1094	0,1480	0,0361	0,0396	45,943	0,0322	4,7743	0,7942	0,3672		
	IX	0,219	0,462	101.178	246,50	4,00	0,231	0,0728	$D_{50} = 0,269 \text{ mm}$ $D_{90} = 0,444 \text{ mm}$ $D_* = 6,813$	0,199	5,084	0,0282	0,1708	0,2187	0,0261	0,0287	43,426	0,0333	5,1756	0,9409	0,4351	0,4554	0,2029
	X	0,224	0,473	105.952		3,85	0,229	0,0736		0,194	5,461	0,0273	0,1667	0,2138	0,0271	0,0299	43,746	0,0339	5,4001	1,0286	0,4756		
	XI	0,219	0,462	101.178	295,00	4,00	0,231	0,0796	$\theta_c = 0,0410$ $u_{*c} = 0,0134 \text{ m/s}$	0,237	4,269	0,0293	0,2077	0,2610	0,0227	0,0250	42,347	0,0342	5,5139	1,0747	0,4969	0,5154	0,2936
	XII	0,224	0,473	105.952		3,85	0,229	0,0805		0,232	4,567	0,0289	0,2031	0,2562	0,0235	0,0260	42,654	0,0347	5,7058	1,1547	0,5339		
III <sup>a</sup> 21/10/74	XIII	0,200	0,467	93.400	161,00	4,00	0,209	0,0562	$\gamma_s=26.192,7 \text{ N/m}^3$ $\gamma=9.786,6 \text{ N/m}^3$	0,116	8,052	0,0239	0,0921	0,1256	0,0381	0,0413	46,012	0,0318	4,3100	0,6121	0,3583	0,3470	0,0530
	XIV	0,201	0,460	92.460			0,211	0,0563		0,120	7,705	0,0257	0,0943	0,1299	0,0372	0,0403	45,820	0,0314	4,1773	0,5732	0,3356		
	XV	0,200	0,467	93.400	205,36		0,209	0,0635	$D_{50} = 0,312 \text{ mm}$ $D_{90} = 0,459 \text{ mm}$ $D_* = 7,934$	0,148	6,311	0,0266	0,1214	0,1607	0,0314	0,0341	44,514	0,0329	4,6837	0,7288	0,4266	0,4137	0,1705
	XVI	0,201	0,460	92.460			0,211	0,0636		0,153	6,043	0,0268	0,1262	0,1663	0,0306	0,0333	44,328	0,0325	4,5464	0,6847	0,4008		
	XVII	0,200	0,467	93.400	232,00		0,209	0,0675	$\theta_c = 0,0372$ $u_{*c} = 0,0138 \text{ m/s}$	0,167	5,593	0,0272	0,1398	0,1816	0,0285	0,0310	43,769	0,0334	4,8578	0,7869	0,4607	0,4504	0,2240
	XVIII	0,201	0,460	92.460			0,211	0,0676		0,173	5,345	0,0275	0,1455	0,1884	0,0278	0,0303	43,590	0,0331	4,7530	0,7517	0,4400		

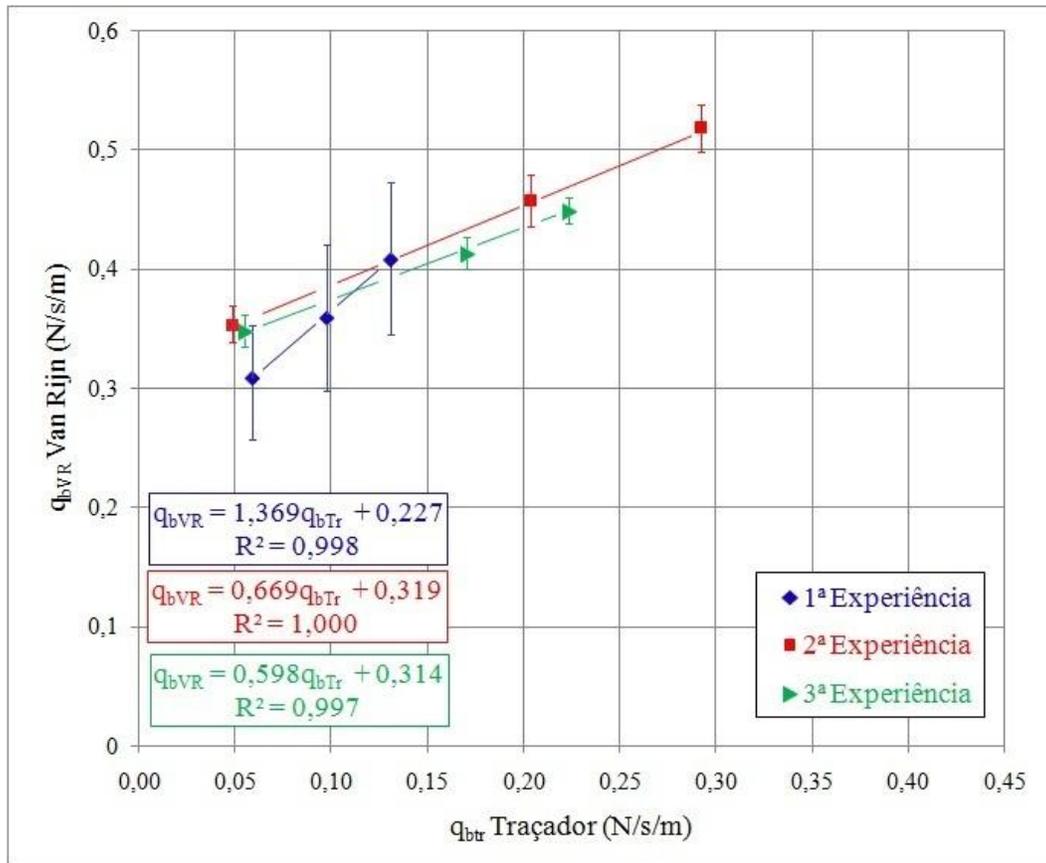


Figura VIII.10 – Comparação das estimativas da descarga sólida por unidade de largura obtidas pelo Método de Van Rijn, com as medições com traçadores radioativos

## VIII.7 EQUAÇÃO DAS DUNAS E RUGAS

O cálculo da descarga sólida por unidade de largura do material do leito pode ser obtido através da aplicação da Equação (7.28), das Dunas e Rugas, onde a velocidade média de deslocamento  $V_d$  e a altura das dunas  $h_d$  são calculadas a partir dos registros Lagrangeanos e Eulerianos das configurações de fundo (WILSON-JR. e PAIVA, 2003).

À medida que a sonda ou emissor-receptor ultra-som do C-Meter se deslocava ao longo do Córrego Vinte e Um, as formas de fundo foram sendo registradas, juntamente com as taxas de contagens emitidas pelos traçadores radioativos, obtendo-se, os registros longitudinais (Lagrangeanos) das formas de fundo e dos sedimentos radioativos, respectivamente. No intervalo de tempo entre essas detecções longitudinais, o carro de transporte automático dos detetores permanecia parado numa seção

transversal, com os aparelhos ligados, registrando-se, assim a passagem dos sedimentos radioativos e as variações temporais (Eulerianas) das formas de fundo.

WILSON-JR. e PAIVA (2003) analisaram os registros Lagrangeanos e Eulerianos de uma das experiências com traçadores radioativos realizada no Córrego Horácio (sub-bacia vizinha à do Córrego Vinte e Um), dos quais foram obtidos os valores dos comprimentos, das alturas e dos tempos de passagem das formas de fundo por seções fixas, transversais ao escoamento. A análise estatística dessas variáveis permitiu que se determinasse com precisão, seus valores médios, assim como a velocidade de deslocamento das formas de fundo. Os resultados obtidos da descarga sólida por arraste, por unidade de largura, situaram-se entre a faixa de resultados medidos com traçadores radioativos.

Nos estudos realizados no Córrego Horácio (WILSON-JR. e PAIVA, 2003), a velocidade média de deslocamento das configurações de fundo (dunas e rugas) foi determinada pela equação:

$$\bar{V}_d = \frac{\bar{L}_x}{\bar{L}_t} \quad (8.14)$$

onde:  $\bar{L}_x$  é o comprimento médio longitudinal da configuração de fundo, e,  $\bar{L}_t$  representa o seu tempo médio de passagem através da seção transversal de registros. Cabe destacar nesta técnica de cálculo da velocidade média de deslocamento das configurações, é que ela cobre todas as faixas de velocidades, comprimentos e tempos de passagem das configurações de fundo.

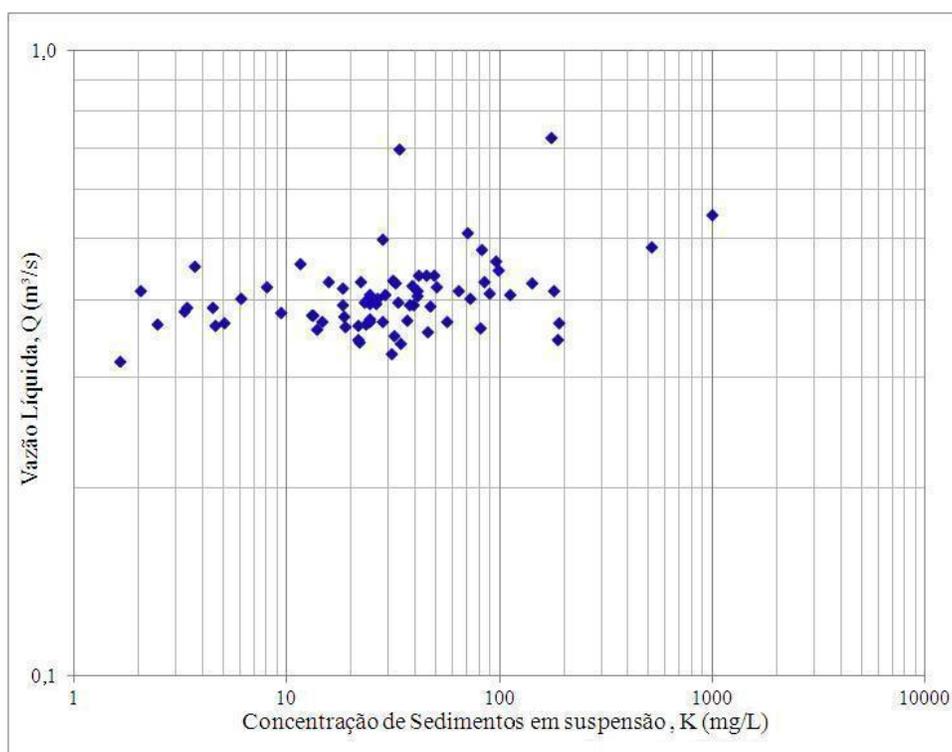
Em vista disto, a metodologia utilizada no Córrego Horácio, apesar de muito minuciosa e precisa, é muito trabalhosa e requer um levantamento manual demorado, e, por isto, não foi possível sua aplicação no Córrego Vinte e Um, devido ao tempo limitado para a elaboração desta dissertação de mestrado. Entretanto, não se pode deixar de recomendar sua aplicação no Córrego Vinte e Um, pois tentativas simplificadoras desta metodologia não forneceram bons resultados, quando comparados com os resultados obtidos com traçadores radioativos.

## **VIII.8 DESCARGA SÓLIDA EM SUSPENSÃO NO CÓRREGO VINTE E UM**

A metodologia e os equipamentos de amostragem de sedimentos em suspensão foram apresentados no Capítulo IV, na seção IV.3.1. Como mencionado,

durante a Campanha de Medições Diárias foram coletadas 359 amostras diárias de sedimentos em suspensão entre 26/06/1974 e 12/03/1976. Durante as Campanhas de Medições Periódicas, a cargo dos hidrometristas, foram realizadas 75 conjuntos de amostras detalhadas de sedimentos em suspensão, cujas concentrações médias através da seção transversal foram relacionadas com as vazões líquidas medidas nestas seções e nos mesmos dias.

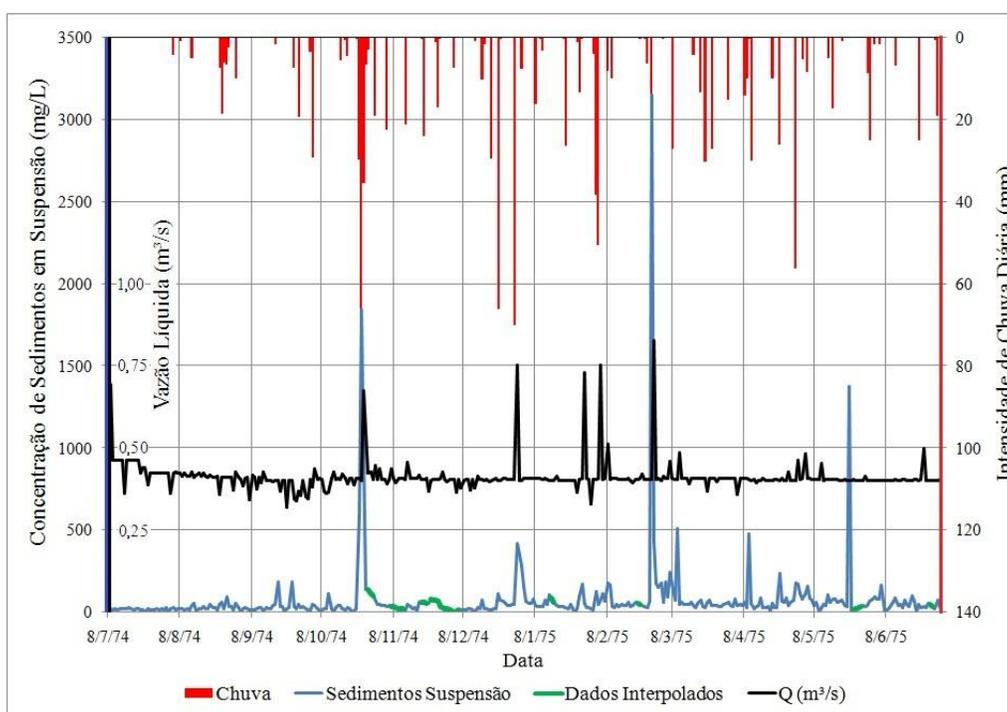
Na **Figura VIII.11**, a seguir, estão plotados os valores medidos da vazão líquida em função da concentração média de sedimentos em suspensão, numa tentativa de relacionar estas duas variáveis, e utilizar a equação resultante para preenchimento dos dados faltosos de concentração da série de valores diários. A série completa de dados diários seria utilizada para determinar a descarga sólida diária dos sedimentos em suspensão, durante o ciclo hidrológico, utilizando-se a curva chave da seção de medidas.



**Figura VIII.11 – Concentração de sedimentos em suspensão em função da vazão líquida obtidos durante a Campanha de Medições Periódicas**

A equação de regressão obtida, do tipo potência, apresentou um coeficiente de determinação muito baixo ( $R^2 = 0,1424$ ), o que desaconselhou o seu uso para o preenchimento dos dados faltosos. Entretanto, como são apenas 46 dados (11%) a serem preenchidos, adotou-se o seguinte critério de preenchimento: (i) os dados faltosos de

concentração de sedimentos relativos a dias não chuvosos ou de intensidade de chuva inferior a 0,1 mm, foram estimados pela interpolação linear, utilizando-se os valores dos dias vizinhos anterior e posterior. Foram preenchidos dados de 44 dias com este tipo de interpolação; (ii) os dois dados faltosos relativos a períodos chuvosos corresponderam à 17,0 e 30,0 mm de intensidade de chuva. Estes dias foram preenchidos com valores de concentração médios obtidos para chuvas de intensidade próxima a 17,0 mm (6 valores) e a 30,0 mm (5 valores). Os resultados foram iguais a 66,25 mg/L e 60,91 mg/L, respectivamente. Estes valores aproximados estão indicados na **Figura VIII.12**, pelo segmento verde da curva de concentração em função do tempo.



**Figura VIII.12 – Séries de dados diários de concentração de sedimentos em suspensão e intensidade de chuva durante o ciclo hidrológico de 08/07/74 a 07/07/75**

Esta **Figura VIII.12** apresenta as séries de valores de vazão líquida, intensidade de chuva e de concentração de sedimentos em suspensão. A série de vazão líquida foi obtida dos resultados das medições realizadas pelos hidrometristas, complementada por valores obtidos das Equações (4.4) e (4.5), que caracterizam a curva-chave da seção de medidas do trecho representativo do Córrego Vinte e Um. A Intensidade de Chuva foi medida diariamente, sem interrupções, durante o ciclo

hidrológico e a série de Concentração de Sedimentos em Suspensão foi preenchida de acordo com a descrição do parágrafo anterior.

Como é frequente acontecer nas medições realizadas em pequenas sub-bacias hidrográficas, as quais apresentam tempo de concentração muito pequeno, constataram-se que:

1. os picos de concentração de sedimentos em suspensão sempre corresponderam aos picos de intensidade de chuva, o que significa que não se mediu nenhuma interferência antrópica direta no curso d'água durante os dias sem chuva.
2. nem todos os picos de intensidade de chuva produziram valores elevados de concentração de sedimentos em suspensão, o que significa que, nestes casos, a amostragem dos sedimentos em suspensão foi realizada antes ou após a passagem da nuvem de sedimentos em suspensão provocada pela chuva. Isto é muito comum em sub-bacias pequenas ( $\leq 40 \text{ km}^2$ ) cujos tempos de concentração são muito reduzidos, medidos em dezenas de minutos.

A descarga sólida dos sedimentos em suspensão foi calculada pelo produto dos valores diários da vazão líquida pela concentração média dos sedimentos em suspensão através da seção de medidas, ou seja:

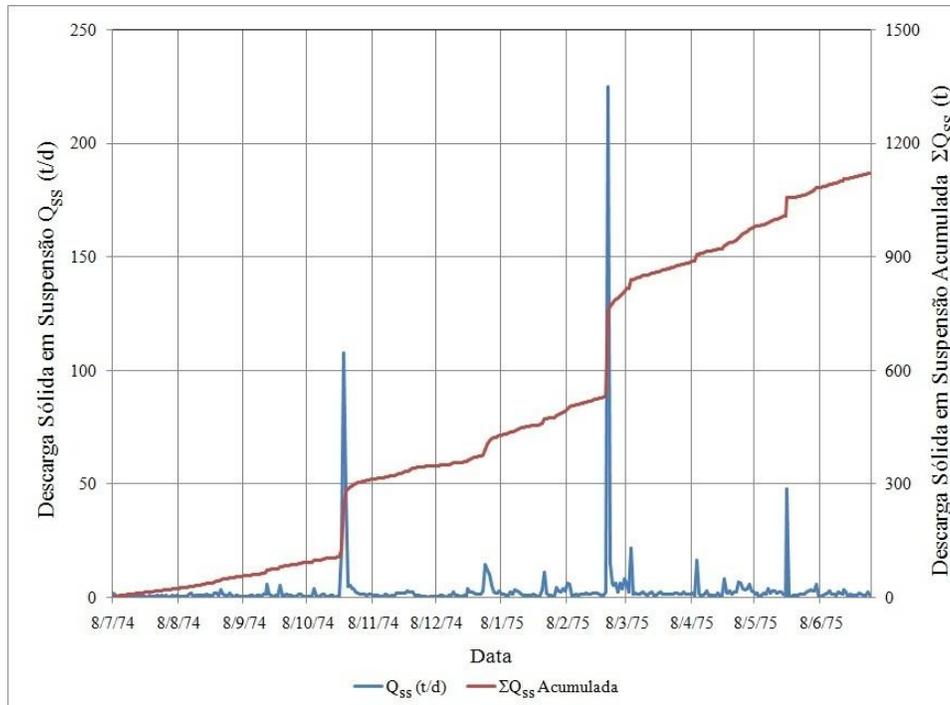
$$Q_{ss} = 0,0864 K Q \quad (8.15)$$

onde:

- $Q_{ss}$  = descarga sólida diária dos sedimentos em suspensão, em t/d;  
 $K$  = concentração de sedimentos em suspensão amostrada, em mg/L;  
 $Q$  = Vazão líquida através da seção de medidas, em  $\text{m}^3/\text{s}$ .

Desta forma, tendo-se os dados de concentração de sedimentos em suspensão para a totalidade dos dias do ciclo hidrológico estudado, não foi necessária a utilização de modelos de descarga sólida em suspensão. Simplesmente, foram calculados os valores diários da descarga sólida do sedimento em suspensão, e em seguida, os valores acumulados durante o ciclo hidrológico estudado.

Na **Figura VIII.13** apresentam-se as séries temporais dos valores de vazão sólida em suspensão, diárias e acumuladas a partir no início do ciclo hidrológico, e na **Figura VIII.14** a curva de massa, que corresponde à plotagem dos valores das descargas sólidas acumuladas dos sedimentos em suspensão, em função das vazões líquidas acumuladas, que atravessaram a seção de medidas durante o ciclo hidrológico.



**Figura VIII.13 – Descargas sólidas em suspensão, diárias e acumuladas**

Observam-se nestas figuras a concordância entre os maiores picos de descarga sólida dos sedimentos em suspensão, com destaque para os dos dias 25/10/74, 27/02/75 e 23/05/75, e as maiores precipitações observadas na sub-bacia durante o ciclo hidrológico. Como as variações das concentrações de sedimentos em suspensão correspondem à resposta mais rápida do escoamento às modificações impostas em sua bacia hidrográfica, os picos de intensidade de chuva e concentração de sedimentos em suspensão são testemunhos do impacto provocado pelo desenvolvimento da pecuária na região de solo do tipo arenito da sub-bacia do Córrego Vinte e Um, durante o ciclo hidrológico estudado.

Destacam-se também destas figuras, a importância das amostragens diárias de sedimentos em suspensão, das leituras linimétricas e das medições de vazões líquidas em diferentes níveis de água, para a obtenção da curva-chave da seção de medições, e, a importância dos gráficos acumulados de vazões líquida e de descargas sólidas.

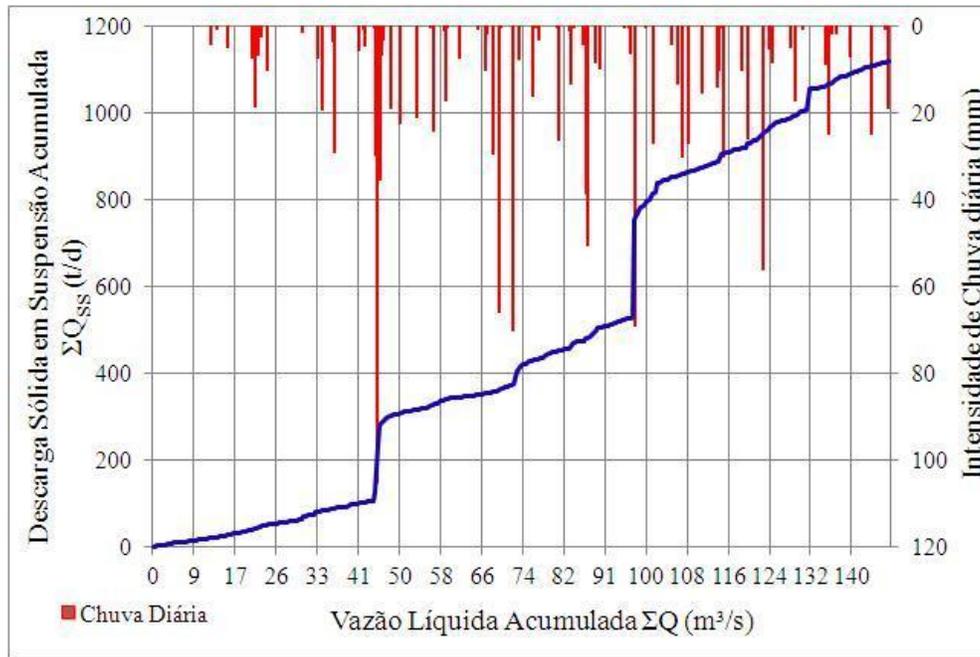


Figura VIII.14 – Curva de massa do Córrego Vinte e Um na estação de Fazenda Vitória

### VIII.9 OBSERVAÇÕES

Neste capítulo, foram apresentados os resultados das descargas sólidas por arraste e por unidade de largura do Córrego Vinte e Um: medidas com traçadores radioativos, pelo Método do Balanço das Taxas de Contagens desenvolvido por COURTOIS e SAUZAY (1966); e estimadas com utilização dos métodos de EINSTEIN (1950), VUKMIROVIC' e VUKOTIC' (1981) e VAN RIJN (1984).

Para os cálculos efetuados, foram considerados 18 regimes hidrossedimentométricos do Córrego Vinte e Um, no trecho Fazenda Vitória, caracterizados por valores medidos da declividade do eixo longitudinal do leito do rio (**S**), do raio hidráulico da seção de medições Eulerianas (**R**) e da velocidade média (**U**) através desta mesma seção. Estes regimes foram observados durante os ensaios com traçadores radioativos, medida direta do movimento por arraste dos sedimentos, realizada durante a Campanha Intensiva de Medidas, parte integrante da Metodologia apresentada no Capítulo III.

Como os valores das variáveis hidráulicas e hidrodinâmicas dos regimes foram obtidos de pares de medições de vazão líquida, realizadas em sequencialmente, portanto num curto período de tempo, e por experiência, os regimes foram agrupados aos pares para comparação com os valores obtidos com traçadores radioativos.

As aplicações dos métodos de EINSTEIN (1950), VUKMIROVIC' e VUKOTIC' (1981) e VAN RIJN (1984) foram apresentadas detalhadamente e de forma didática, para que os cálculos possam ser acompanhados através das tabelas e gráficos apresentados no capítulo. Os gráficos finais de cada método consistiram da comparação dos valores das descargas sólidas lineares estimados pelas fórmulas clássicas, e medidos com traçadores radioativos.

No próximo capítulo serão discutidos os resultados obtidos com os métodos selecionados, e apresentadas considerações sobre sua utilização.

## CAPÍTULO IX

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

**IX.1** Para as descrições qualitativa e quantitativa do movimento de sedimentos no Córrego Vinte e Um, na região Noroeste do Estado do Paraná, foi adotada a metodologia apresentada no **Capítulo III**, que comporta três etapas:

➤ Conhecimento da sub-bacia hidrográfica, que constitui o Espaço Geográfico do estudo, englobando suas características hidrológicas, geográficas, topográficas, geológicas e sócio-econômicas.

➤ Medições *in-situ*, num trecho representativo do escoamento, do movimento global de sedimentos, e, durante a realização destas medições,

➤ Determinação das características hidráulicas, sedimentológicas e meteorológicas, sob as quais as medições foram realizadas.

**IX.2** Os estudos hidrossedimentológicos do Córrego Vinte e Um se inseriram no projeto financiado pela Organização dos Estados Americanos – OEA e pela Secretaria de Viação e Obras Públicas do Estado do Paraná – SVOP-PR, denominado “Medida da Massa de Sedimento Transportado por Rios da ‘Bacia do Prata’”, cujos trabalhos de campo foram realizados no período de Junho de 1974 a Julho de 1975.

**IX.3** As três campanhas de campo da segunda etapa da metodologia adotada foram realizadas no trecho denominado Fazenda Vitória, e constaram de:

➤ **Campanha de observações diárias**, a cargo de observadores locais, compreendendo medições de volume de precipitação e determinação da intensidade de chuva, leituras de nível d’água, amostragens de sedimentos em suspensão, e, determinação em laboratório da concentração e granulometria do sedimento amostrado.

➤ **Campanha de observações periódicas**, efetuadas por hidrometristas dos Estados do Paraná e Minas Gerais, abrangendo medições de velocidade,

cálculo de vazão líquida, amostragens de sedimentos em suspensão, amostragem e análise granulométrica do sedimento do leito.

➤ **Campanha intensiva de medições**, mobilizando toda a equipe técnica, compreendendo amostragem de sedimentos por arraste, registro das configurações de fundo e medições especiais com traçadores radioativos.

**IX.4** A finalidade das medições especiais com traçadores radioativos foi dupla. Primeiro, eles foram utilizados como parâmetro de calibração das relações analíticas obtidas entre as variáveis hidrodinâmicas e sedimentológicas, e também, para obtenção de uma medida direta e precisa da descarga sólida do material do leito, no trecho representativo do escoamento. Nesta dissertação, os valores obtidos com traçadores radioativos foram utilizados com esta finalidade.

**IX.5** A outra medição direta do movimento de sedimentos consistiu dos registros contínuos longitudinais e temporais, das configurações de fundo, os quais forneceram valores dos comprimentos, das alturas e dos tempos de passagem das formas de fundo por seções fixas transversais ao escoamento. Em princípio, a análise estatística dessas variáveis permite que se determine com precisão, seus valores médios, assim como a velocidade de deslocamento das formas de fundo.

Esta análise não foi possível de ser concretizada no Córrego Vinte e Um, devido ao tempo limitado que se dispunha para a elaboração da dissertação de mestrado. Entretanto, não se pode deixar de recomendar sua aplicação minuciosa, pois tentativas simplificadoras desta análise não forneceram resultados satisfatórios, quando comparados com os resultados obtidos com traçadores radioativos.

**IX.6** Nesta dissertação, foi utilizada parte dos dados hidrossedimentológicos da sub-bacia do Córrego Vinte e Um. Os dados obtidos nos trabalhos de campo realizados na Bacia Hidrográfica do Rio Ivaí representam um acervo valioso de dados para pesquisa sedimentológica, mas precisam ser digitalizados e organizados para a otimização de seu tratamento. É importante que estas atividades sejam feitas imediatamente, pois com o passar do tempo, as restituições das experiências, baseadas no preenchimento das séries de dados hidrossedimentológicos e suas utilizações, tornam-se mais difíceis, e

praticamente impossíveis, sem a presença dos realizadores dos trabalhos de campo.

**IX.7** O **objetivo principal** da dissertação foi cumprido: a aplicação e aperfeiçoamento da metodologia desenvolvida no Brasil sobre o estudo do movimento de sedimentos em escoamentos com superfície livre, com utilização de métodos hidrossedimentométricos clássicos e com traçadores radioativos.

Esta metodologia e sua aplicação no Córrego Vinte e Um, foi detalhada no Capítulo III. Como se trata da primeira série de experiências realizadas com traçadores radioativos, realizada na Bacia Hidrográfica do Rio Ivaí, ela exigiu mais da equipe de campo, e, por isto, não foi acompanhada de séries tão completas de levantamentos hidrossedimentométricos especiais, realizados durante o uso de traçadores, como as séries das aplicações que se seguiram, realizadas no Córrego Horácio e Ribeirão do Rato, respectivamente.

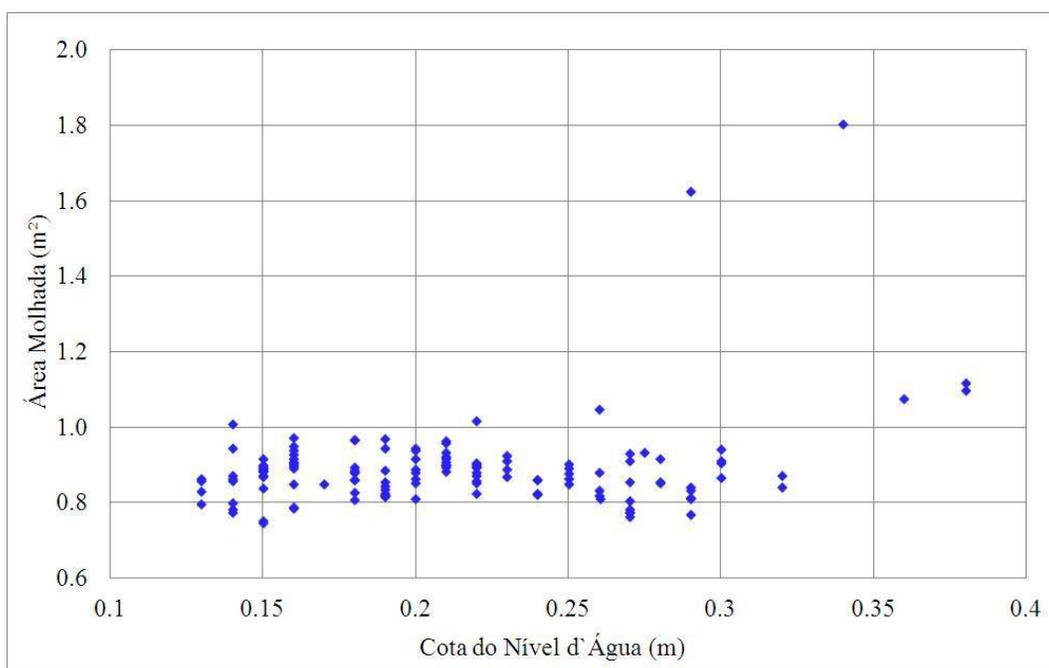
Embora o número de detecções longitudinais e temporais do movimento de sedimentos radioativos por arraste e o registro das configurações de fundo tivessem sido o mesmo dos estudos que se seguiram, acredita-se que poderiam ter sido realizadas mais coletas de sedimentos por arraste, fundo e suspensão, assim como medições de vazões líquidas, distribuídas durante as horas em que se acompanhou o movimento do material do leito marcado com radioisótopos.

Os **objetivos secundários** também foram cumpridos. Na realidade, eles se constituíram das etapas intermediárias necessárias para a aplicação da metodologia adotada.

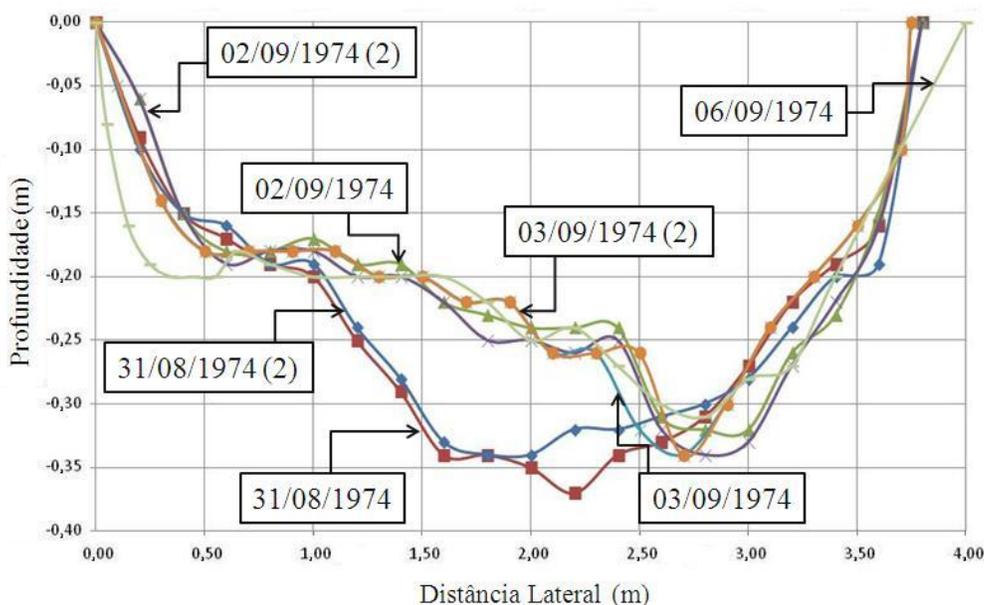
**IX.8** As séries de medições diárias e periódicas foram extensas e detalhadas, principalmente, as observações do nível d'água, amostragens de sedimentos em suspensão, medições de intensidade de chuva e vazão líquida, entre outras. Destacam-se nesta dissertação as seguintes constatações, de interesse também para outros trechos de escoamentos fluviais de sub-bacias de características fisiográficas semelhantes à do Córrego Vinte e Um.

**IX.8.1** A alta mobilidade do leito do Córrego Vinte e Um ficou evidenciada pela variação morfológica da seção transversal. Pequenas variações do nível

d'água, provocaram grandes variações de vazão líquida (**Figura IV.14**) e alterações significativas da área molhada da seção transversal, como apresentado na **Figura IX.1**, a seguir. Estas variações foram devidas, notadamente, à mobilidade do leito. Como exemplo, mostram-se na **Figura IX.2**, seguinte, perfis transversais variados da seção de medidas, obtidos em diferentes datas, mas para o mesmo valor de vazão líquida! Como parte significativa das fórmulas do movimento de sedimentos não consideram estas variações morfológicas da seção e trecho de medidas, **conclui-se, ser necessário uma atenção e levantamentos especiais, durante o ciclo hidrológico, dos perfis transversal e longitudinal dos leitos dos cursos d'água, e para as estimativas da descarga sólida, considerar estas variações morfodinâmicas do leito móvel.**



**Figura IX.1 – Área da seção de medidas em função da cota do nível d'água do Córrego Vinte e Um, no trecho da Fazenda Vitória**



**Figura IX.2 – Perfis transversais da seção de medidas do Córrego Vinte e Um para a mesma cota do nível d'água ( $Z = 0,27$  m)**

**IX.8.2** A variação da **espessura da camada móvel** do leito do Córrego Vinte e Um foi medida durante as detecções longitudinais das nuvens de traçadores radioativos. Constataram-se que os valores médios da espessura de transporte variaram em função do tempo, de forma contínua, em todas as experiências com traçadores radioativos. O valor mínimo medido foi igual a 1,7 cm (terceira experiência) e o máximo igual a 10,5 cm, conforme registrado nas **Tabelas VI.9 e VI.10**. Esta variação da espessura da camada móvel é mais uma indicação da sensibilidade do leito móvel do rio às variações hidrodinâmicas do escoamento. Atesta que o fundo se modifica mais fácil e rapidamente que as margens do trecho representativo, como mostrado na **Figura IX.2**.

**IX.8.3** A grande mobilidade do leito dificultou a obtenção direta de uma curva chave que pudesse ser utilizada para a complementação dos dados diários faltosos das variáveis hidrodinâmicas, a exemplo da vazão líquida, durante o ciclo hidrológico. Para esta variável, foram testadas expressões normalmente utilizadas na literatura para a obtenção da curva chave do Córrego Vinte e Um. Nenhuma delas apresentou um ajuste significativo para os dados de vazão

obtidos durante as campanhas periódicas. Optou-se, então, por utilizar as Equações 4.4 e 4.5, ajustada aos valores experimentais pelo método dos MAG (Modelos Aditivos Generalizados), que permitiram descrever o comportamento da vazão líquida em função da cota do nível d'água.

**IX.8.4** Outra dificuldade observada, principalmente no registro de dados, foi o tempo reduzido de resposta do escoamento aos eventos de chuva ocorridos na sub-bacia hidrográfica, o que dificultou o monitoramento, com os equipamentos que se dispunham, dos valores extremos das variáveis hidrossedimentológicas. Assim, é altamente recomendável que as medições e amostragens descritas nas Campanhas de Observações Diárias, Periódicas e Especiais, sejam feitas com equipamentos de registros e amostragens contínuas das variáveis hidrológicas, hidrodinâmicas e sedimentológicas.

**IX.9** Na **Tabela VI.10** estão apresentados os valores das descargas sólidas por arraste e por unidade de largura, obtidas com os traçadores radioativos. Estes valores foram utilizados para calibração das equações clássicas do transporte por arraste: de **EINSTEIN(1950)**, **VUKMIROVIC'-VUKOTIC' (1981)** e **VAN-RIJN (1984b)**.

**IX.10** As análises hidrossedimentométricas foram realizadas para cada experiência de traçador radioativo. Especificaram-se 18 regimes hidrossedimentológicos, a partir de pares de valores do raio hidráulico e da velocidade média, obtidos durante as medições de vazão líquida. Estes valores foram associados aos valores mínimo, médio e máximo da declividade longitudinal do eixo central do leito do escoamento e da descarga sólida por unidade de largura, medidos durante as detecções do movimento dos traçadores radioativos. Desta forma, foram consideradas as 3 experiências, e para cada uma: 3 pares de valores da declividade do eixo longitudinal (S) e da descarga sólida por unidade de largura medido com traçador radioativo ( $q_b$ ), 2 pares de valores do raio hidráulico (R) e da velocidade média (U), perfazendo um total de  $3 \times 3 \times 2 = 18$  regimes hidrossedimentométricos do Córrego Vinte e Um, apresentados na **Tabela VIII.3**. Cada experiência conta também com os valores dos diâmetros característicos dos sedimentos de fundo ( $D_i$ ) que foram injetados no leito do escoamento, e dos valores do peso específico do grão de sedimento ( $\gamma_s - \gamma$ ), que no caso da primeira e segunda experiências com  $Au^{198}$  correspondem a

16.209,95 N/m<sup>3</sup>, e no caso da terceira experiência, com Ir<sup>192</sup>, corresponde a 16.406,15 N/m<sup>3</sup>. Esses regimes hidrossedimentológicos estão resumidos na **Tabela VIII.3**.

**IX.11** Cada experiência com traçador radioativo foi caracterizada por seis regimes hidrossedimentológicos, conforme apresentado na **Tabela VIII.3**, que puderam ser agrupados por pares de regimes, com o mesmo valor de declividade longitudinal, *S*. Para a comparação e calibração das fórmulas do transporte de sedimentos, com os resultados obtidos com traçadores radioativos, foram utilizados os três valores médios da descarga sólida por unidade de largura, obtidos a partir dos três pares de regimes hidrossedimentológicos de cada experiência, conforme mostrado na **Tabela VIII.3** e na **Tabela IX.1**, a seguir, onde estão apresentados os valores obtidos por regime e de acordo com as expressões utilizadas para a estimativa do transporte sólido.

**IX.12** Observa-se da **Tabela IX.1** que os valores absolutos da descarga sólida por unidade de largura, obtidos com as aplicações das fórmulas clássicas, foram muito diferentes uns dos outros, e, também, diferentes dos resultados obtidos com os traçadores radioativos. Na **Tabelas IX.2** estão apresentados os desvios percentuais dos resultados das descargas sólidas médias de cada autor em relação aos resultados obtidos com traçadores radioativos, para as três experiências e para os três pares de regimes considerados.

Os desvios percentuais em relação às medições com traçadores radioativos, das estimativas com o método de **EINSTEIN** (1950) variaram de 2,94 a 76,53 %; de 0,59 a 15,47 % com o método de **VUKMIROVIC'** e **VUKOTIC'** (1981), e de 75,54 a 554,72 % com o método de **VAN RIJN** (1984b).

O fato dos resultados do método de **VUKMIROVIC'** e **VUKOTIC'** (1981) terem sido bem próximos dos resultados das medidas com radioisótopos deve-se ao processo desenvolvido para sua aplicação. Com efeito, foi utilizado o método generalizado, desenvolvido por **NERY**(2002), que consiste em calibrar a Equação de **VUKMIROVIC'** e **VUKOTIC'** (1981), com resultados quantitativos levantados com traçadores radioativos, durante a Campanha de Medições Especiais.

**Tabela IX.1 – Estimativas da descarga sólida por unidade de largura do Córrego Vinte e Um, em Fazenda Vitória**

Experiência	Regime	Descargas sólidas por arraste por unidade de largura $q_b$ (N/m.s)			
		Traçador	Einstein	Vukmirovic'- Vukotic'	Van Rijn
I <sup>a</sup> (12/10/1974)	I	0,0576	0,0376	0,0357	0,2594
			0,0451	0,0567	0,3076
	II		0,0525	0,1044	0,3558
	III	0,0978	0,0429	0,04723	0,3023
			0,0510	0,0921	0,3590
	IV		0,0590	0,1581	0,4157
	V	0,1315	0,0474	0,0710	0,3501
			0,0560	0,1298	0,4090
	VI		0,0645	0,2145	0,4687
II <sup>a</sup> (16/10/1974)	VII	0,0510	0,0500	0,0333	0,3391
			0,0525	0,0507	0,3532
	VIII		0,0549	0,0722	0,3672
	IX	0,2029	0,0600	0,1323	0,4351
			0,0629	0,1771	0,4554
	X		0,0657	0,2290	0,4756
	XI	0,2936	0,0661	0,2374	0,4969
			0,0689	0,3000	0,5154
	XII		0,0717	0,3698	0,5339
III <sup>a</sup> (21/10/1974)	XIII	0,0530	0,0463	0,0802	0,3583
			0,0448	0,0612	0,3470
	XIV		0,0433	0,0455	0,3356
	XV	0,1705	0,0529	0,2053	0,4266
			0,0512	0,1642	0,4137
	XVI		0,0494	0,1290	0,4008
	XVII	0,2240	0,0565	0,3034	0,4607
			0,0547	0,2527	0,4504
	XVIII		0,0529	0,2053	0,4400

**Tabela IX.2 – Desvios percentuais das estimativas da descarga sólida média por unidade de largura do Córrego Vinte e Um, em relação aos resultados obtidos com traçadores radioativos**

Experiência	Regime	Desvios percentuais dos valores estimados da descarga sólida por arraste e por unidade de largura (Desvios em % em relação às medidas com traçador radioativo)			
		Traçador $Q_b$ (N/m.s)	Einstein	Vukmirovic'-Vukotic'	Van Rijn
I <sup>a</sup> (12/10/1974)	I	0,0576	21,70	01,56	434,03
	II				
	III	0,0978	47,85	05,83	267,08
	IV				
	V	0,1315	57,41	01,29	211,03
	VI				
II <sup>a</sup> (16/10/1974)	VII	0,0510	02,94	00,59	307,45
	VIII				
	IX	0,2029	69,00	12,72	124,45
	X				
	XI	0,2936	76,53	02,18	75,54
	XII				
III <sup>a</sup> (21/10/1974)	XIII	0,0530	15,47	15,47	554,72
	XIV				
	XV	0,1705	69,97	03,70	142,64
	XVI				
	XVII	0,2240	75,58	12,81	101,07
	XVIII				

**IX.13** Resultados tão ou mais precisos que os obtidos com a Fórmula de **VUKMIROVIC'** e **VUKOTIC' (1981)**, podem também ser obtidos com as Expressões de **EINSTEIN(1950)** e **VAN-RIJN (1984b)**, com a metodologia apresentada em **ECKHARDT e WILSON-Jr. (1998)**; **ECKHARDT (1998)** e **WILSON-Jr. (1999)**.

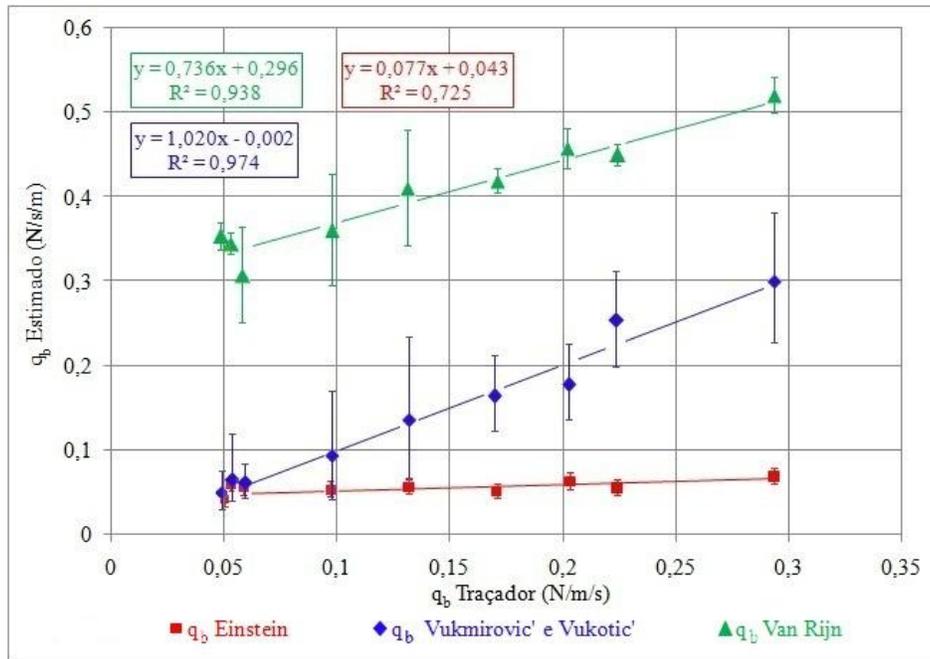
Em lugar de simplesmente aplicar as diferentes expressões matemáticas aos escoamentos naturais, essa metodologia propõe que as estimativas da descarga sólida de um escoamento natural, compreendam duas fases imprescindíveis:

- (i) Estudo das Fórmulas de Transporte Sólido a serem utilizadas, verificando suas hipóteses básicas e simplificadoras, as características hidrodinâmicas e sedimentológicas em que foram deduzidas e em que condições experimentais foram obtidos seus coeficientes.
- (ii) Verificação das hipóteses básicas e simplificadoras, assim como, se os valores dos coeficientes utilizados se aplicam aos rios estudados, reproduzindo, *in situ*, os ensaios e as medições necessárias para estas verificações.

**IX.14** Infelizmente, os dados hidrossedimentológicos utilizados nesta dissertação já haviam sido coletadas há várias décadas, impedindo que os ensaios e as medições citadas, necessárias à cada método, pudessem ser realizadas.

Entretanto, quando os valores absolutos da descarga sólida por unidade de largura, obtidos com as aplicações das fórmulas clássicas, foram comparados com os resultados obtidos com os traçadores radioativos, para cada **experiência**, obtiveram-se equações lineares muito bem ajustadas, com coeficientes de determinação determinados pelo Método dos Mínimos Quadrados, próximos da unidade. Estas relações lineares foram apresentadas nas **Figuras: VIII.5** (Método de EINSTEIN, 1950;  $R^2 \geq 0,997$ ); **VIII.10** (Método de VUKMIROVIC' e VUKOTIC', 1981;  $R^2 \geq 0,997$ ) e **VIII.11** (Método de VAN RIJN, 1984b).

Resultados tão bons quando os citados acima, foram obtidos quando os resultados das três experiências foram tratados em conjunto, como apresentado na **Figura IX.3**, a seguir.



**Figura IX.3 – Comparação dos resultados das descargas sólidas por arraste, por unidade de largura, obtidas pelos métodos clássicos e dos traçadores radioativos**

**IX.15** Estes resultados mostram que os métodos clássicos seguem as tendências hidrossedimentológicas do trecho do Córrego Vinte e Um, ou seja, os mesmos sentidos das variações observadas com traçadores radioativos. Em outras palavras, as equações do transporte sólido, que caracterizam os métodos de EINSTEIN (1950), VUKMIROVIC'-VUKOTIC' (1981) e VAN-RIJN (1984b), podem ser ajustadas aos resultados obtidos dos ensaios com traçadores radioativos, ou seja, suas equações podem ser calibradas para permitir que os resultados sejam próximos daqueles medidos experimentalmente no Córrego Vinte e Um. Para isto, recomenda-se que seja utilizada a Metodologia apresentada por ECKHARDT e WILSON-Jr. (1998); ECKHARDT (1998) e WILSON-JR. (1999). A aplicação do Método de VUKMIROVIC'-VUKOTIC' (1981) adotada nesta dissertação, confirma que bons resultados podem ser esperados com a adoção desta metodologia.

**IX.16** Na **Figura VIII.14** foram apresentadas as séries temporais dos valores da descarga sólida em suspensão, diários e acumulados, e na **Figura VIII.15** a curva de massa, que corresponde à curva dos valores das descargas sólidas

acumuladas dos sedimentos em suspensão, em função das vazões líquidas acumuladas, que atravessaram a seção de medidas durante o ciclo hidrológico.

A concordância entre os picos de intensidade de chuva e de concentração de sedimentos em suspensão são testemunhos do impacto provocado pelo desenvolvimento da pecuária na região de solo do tipo arenito, da sub-bacia do Córrego Vinte e Um.

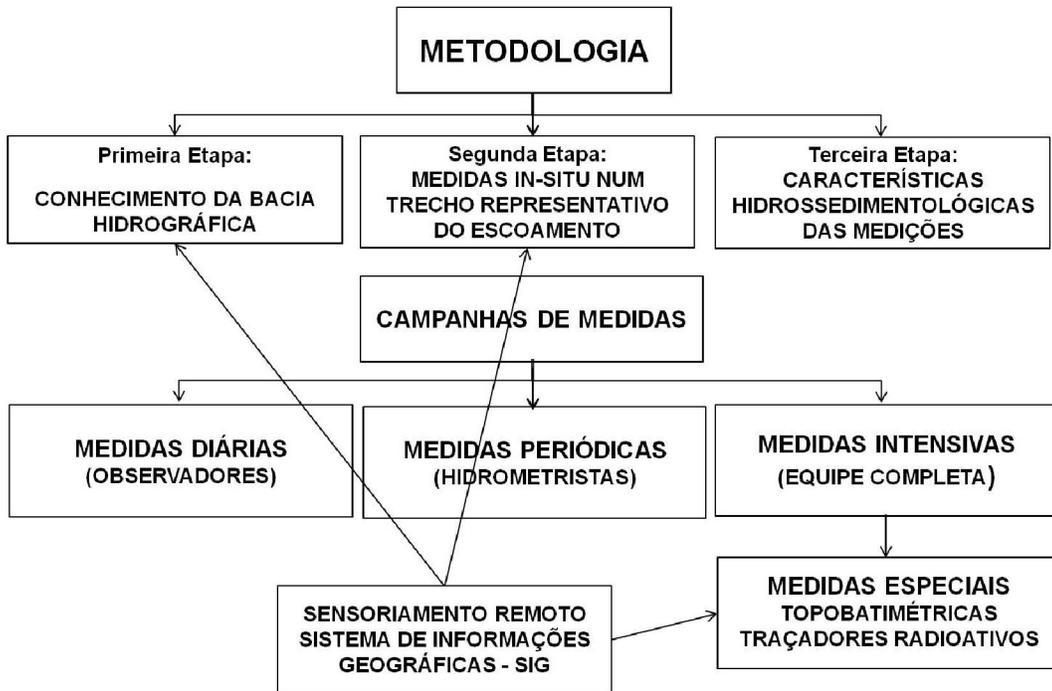
As variações das concentrações de sedimentos em suspensão correspondem à resposta mais rápida do escoamento às modificações impostas em sua bacia hidrográfica. Como nas pequenas sub-bacias, o tempo de concentração é muito reduzido, é recomendável o uso de equipamentos de registros contínuos de dados, tais como de registros da intensidade de chuva (pluviógrafos), do nível d'água (linígrafos) e da concentração de sedimentos em suspensão (siltímetros, por exemplo).

**IX.17** As observações obtidas durante as campanhas de medidas, em especial durante as Campanhas de Medições Intensivas, são limitadas no tempo e a condições hidrometeorológicas bem definidas, que precisam ser bem conhecidas, para que os dados possam ser extrapolados. A **metodologia** foi desenvolvida com o uso de traçadores radioativos e levantamentos topobatimétricos como medições especiais. Ela foi consolidada no trecho inferior do Rio Ivaí no Estado do Paraná (WILSON-JR.e VUKMIROVIC', 1980) e aplicada no Ribeirão do Rato (DA HORA, 1996) e no Córrego Horácio (NERY, 2002). Entretanto, como o uso de radioisótopos em escoamentos com superfície livre tem se restringido aos Institutos de Energia Nuclear, outros métodos têm sido cogitados para a medição direta dos movimentos dos sedimentos, calibração e validação das expressões e modelos do movimento de sedimentos do leito.

Atualmente, propõe-se a realização das seguintes medições e cálculos especiais, durante as campanhas intensivas de medidas: (i) Levantamentos topobatimétricos do trecho representativo; (ii) Estimativa da batimetria do trecho com uso de imagens de satélite de alta resolução; (iii) Evolução temporal da morfologia do trecho, com imagens de média e alta resoluções.

O diagrama que mostra a **Metodologia Recomendada**, adaptada às novas técnicas de calibração e validação das expressões do movimento de sedimentos

está apresentada na **Figura IX.4**, a seguir (WILSON-JR., 1999 e 2009; SILVA e WILSON-JR., 2013).



**Figura IX.4 – Movimento de sedimentos em escoamentos com superfície livre (WILSON-JR., 1999, 2009; SILVA e WILSON-JR., 2013)**

## BIBLIOGRAFIA

- ACKERS, P., WHITE, W. R., 1973. ***Sediment Transport: New Approach and Analysis***. Journal of the Hydraulics Engineering, ASCE, N° HY11, 99(11), 2041-2060.
- ASCE 2007. ***Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling and Practice***. Edited by Garcia, M.H. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice n° 110. USA.
- BAGNOLD, R.A., 1973. ***The Nature of Saltation and of Bed-Load Transport in Water***. Proc. Royal Soc, London, England.
- BEDMAR, A.P., 1972. ***Isótopos em Hidrologia***. Editorial Alhambra, Madrid, Espanha.
- BERTONI, J., LOMBARDINETO, F., 1993. ***Conservação dos Solos***. Ícone Editora. Coleção Brasil Agrícola. 355 p.il. Piracicaba, SP.
- CANDEIRO, R.E., 2008. ***Unidade compacta para produção de radiotraçador gasoso ch3 82br e desenvolvimento de metodologia para inspeção em instalações industriais***. Teses de Doutorado, Universidade Federal de Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.
- CAVALCANTI, L.M., 2007. ***Crescimento da População de Estado do Paraná***. pp 63-66. Em: Carvalho M. S., Fresca T.M. (Eds), ***Geografia e Norte do Paraná: um Resgate Histórico***, Volume 1, Editorial Humanidades, Londrina, PR.
- CENTENO, J.A.S, RISSO, A., 1991. ***Sistemas de Informação Geográfica, Base de Dados para a Engenharia de Sedimentos***. I ENES, pp. 64-67, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.
- CHENG, N. S., 2002. ***Exponential formula for bedload transport***. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 128(10), 942-946. Disponível em: <http://www.ntu.edu.sg/home/cnscheng/Publications/reprint/PAPER%20FOR%20WEB%20Bedload%20transport%20formula.pdf>
- COURTOIS, G., SAUZAY, G., 1966. ***Les Méthodes de Bilan des Taux de Comptage de Traceurs Radioactifs Appliquées à la Mesure des Débits Massiques de Charriage***. La Honille Blanche n° 3. Revue de la Société Hydrotechnique de France. France.
- DA HORA, M. A. G. M., 1996. ***Avaliação do Transporte de Sólidos na Sub-bacia do Ribeirão do Rato, Região Noroeste do Estado do Paraná***. Dissertação de Mestrado. 280 p. Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

- DÉLIO, F., *et al.*, 1996. **Inventario das Estações Fluviométricas**. Brasília: DNAEE
- DÉLIO, F., *et al.*, 1996. **Inventario das Estações Pluviométricas**. Brasília: DNAEE
- DE SOUZA e SILVA, M.G., WILSON-JR, G., 2013. **Evolução Morfológica de Trechos de Escoamentos Fluviais**. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, RS. 8p.
- ECHARDT, M., 1998. **Estimativa do Transporte de Sedimento em Escoamentos com Superfície Livre pelo Método de Toffaleti**, Dissertação de Mestrado. 247 p. Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- ECHARDT, M., WILSON-Jr.,G. 1998. **Estimativa do Transporte de Sedimento em Escoamentos com Superfície Livre pelo Método de Toffaleti**, III Encontro de Engenharia de Sedimentos, Belo Horizonte, MG.
- EINSTEIN, H.A., 1950. **The Bedload function for Sediment Transportation in Open Channel Flows**, Technical Bulletin No. 1062, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service.
- ENGELUND, F., 1966. **Hydraulic Resistance of Alluvional Streams**. Journal of Hydraulics Division, Vol.92, HY2, Proc. Am. Soc. Civ. Engrs. March.
- ENGELUND, F., HANSEN, E., 1967. **A Monograph on Sediment, Transport in Alluvial Streams**. TekniskForlag, Copenhagen, Denmark.
- GASPAR, E., ONCESCU, M., 1972. **Developments in Hydrology: Radioactive Tracers in Hydrology**. Ed. Academiei Republicii Socialiste România, Bucarest, Romania.
- HASTIE, T., TIBSHIRANI, R., FRIEDMAN, J., 2009. **The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Interference and Prediction**. Editorial Springer, Califórnia, EUA.
- HARACENKO, A.A., 2007. **O Processo de Transformação do território no Noroeste do Paraná e a construção das novas territorialidades camponesas**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. Disponível em:  
<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8136/tde-28012008-114211/pt-br.php>
- HUBBELL, D. W., 1964. **Apparatus and Techniques for Measuring Bedload**. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1748, United States Government Printing Office, Washington, D.C. EUA.
- IBGE, 1970. **Censo Agropecuario-Paraná**. Rio de Janeiro, RJ.

- KEULEGAN, G.,H, 1938. ***Laws of Turbulent Flow in Open Channels***. National Bureau of Standards, Journal Research, Vol. 21: 707-741. Washington, D.C. EUA.
- MAACK , R., 1981. ***Geografia Física do Estado do Paraná***, Ed.:Rio de Janeiro, RJ:José Olympio Curitiba, PR:Secretaria da Cultura e do Esporte.450 p.
- MEYER-PETER, E.,MULLER, R., 1948. ***Formulas for Bed-Load Transport***. Report on Second Meeting of International Association for Hydraulic Research, pp. 39-64, Stockholm, Sweden.
- NERY,R.,2002. ***Estimativa do transporte e dispersão de sedimentos com uso de métodos clássicos e radioativos: aplicação na sub-bacia do Córrego Horácio/Noroeste do Paraná***. Dissertação de Mestrado. 214 p. Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- PUTMAN, J.L., SMITH, D.B., 1956. ***Radioactive Tracer Techniques for Sand and Silt Movements Under Water***.Atomic Energy Research Establishment . Oxfordshire, England.
- RODRIGUES, H.T.,WILSON-JR, G., 1974. ***Massas e Atividades dos Traçadores Radioativos a Serem Injetados em Rios do Noroeste do Paraná***. Laboratório de Radioisótopos do Instituto de Pesquisas Radioativas. CBTN. Belo Horizonte, MG.
- RUBINOW, S.I., KELLER, J.B., 1961. ***The Transverse Force on a Spinning Sphere Moving in a Viscous Fluid***. Journal of Fluid Mechanics. Vol. 11, pag. 454. Cambridge University Press. England.
- SAFFMAN,P.G., 1965. ***The Lift on a Small Sphere in a Slow Shear Flow***. Journal of Fluid Mechanics. Vol. 22, pag. 393 e Vol. 31. Cambridge University Press. England.
- SÃO PAULO, SECRETARIA DE ENERGIA E SANEAMENTO. DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA, 1990. ***Controle de Erosão: bases conceituais e técnicas; diretrizes para planejamento urbano e regional; orientações para o controle de boçorocas urbanas***, São Paulo, DAEE/IPT, 2ª. Edição.
- SHIELDS, A., 1936. ***Application of Similarity Principles, and Turbulence Research to Bed-Load Movement***. California Institute of Technology. Pasadena (Traslated from German).
- SIMONS, D.B., RICHARDSON, E.V., NORDIN, C.F., 1965. ***Bedload Equation for Ripples and Dunes***. Geological Survey Professional Paper 462-H, United States Government Printing Office, Washington, D.C.EUA.

- SUDESUL, 1972. **Relatório do Estudo para o Controle da Erosão no Noroeste do Estado do Paraná**. República Federativa do Brasil. Organização dos Estados Americanos. Ministério do Interior/ DNOS. Curitiba, PR.
- SUDESUL, 1973. **Estudo para o Desenvolvimento Regional do Noroeste do Estado do Paraná**. República Federativa do Brasil. Organização dos Estados Americanos. Documento Informativo. Curitiba, PR.
- SUDESUL, 1974. **Estudo para o Desenvolvimento Regional do Noroeste do Estado do Paraná**. República Federativa do Brasil. Organização dos Estados Americanos. Documento Informativo. Porto Alegre, RS.
- VANONI, V.A., BROOKS, N.H., 1957. **Laboratory Studies of the Roughness and Suspended Load of Alluvial Streams**. Sedimentation Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, EUA .
- VANONI, V.A., HWANG, L., 1967. **Relation between Bed Forms and Friction in Streams**. *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 93(HY3) 121-144.
- VAN RIJN, L., 1984a. **Sediment Transport, part I: Bed Load Transport**. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 110, N° 10. ASCE.
- VAN RIJN, L., 1984b. **Sediment Transport, part III: Bed Form and Alluvial Roughness**. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 110, N° 12. 1733-1754. ASCE.
- VAN RIJN, L., 1993. **Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas**. Ed: *Agua Publications*. Amsterdam, The Netherlands.
- VIEIRA DA SILVA, WILSON-JR. G., 2005. **Hidráulica Fluvial, Volume II**. 256 p. il. Ed.: COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- VUKMIROVIC', V., VUKOTIC', R., 1981. **Bed-load Transportoin Small Rivers**. Faculty of Civil Engineering, Belgrade University, 7 p., Iugoslávia.
- WALPOLE, R., MYERS, R., 1992. **Probabilidad y Estadística**. 797 p. Ed. McGraw-Hill, Quarta Edição. Santiago, Chile.
- WILSON-JR., G., 1972. **Transporte e Dispersão de Areia em Canais de Laboratório**. Tese apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Ciências e Técnicas Nucleares. Volumes I e II, p.235, UFMG, Belo Horizonte, MG.
- WILSON-JR., G., VUKMIROVIC', V., 1973. **Medida da Descarga Sólida de Arrasto no Canal de São Gonçalo, Pelotas. Análise Hidráulica**. IPR-Instituto de Pesquisas Radioativas CNEN, UFMG. 32 p. Belo Horizonte, MG.

- WILSON-JR.,G. RODRIGUES, H.T. SANTOS, J.S., 1974. ***Considerações Sobre as Estações de Medidas da Bacia do Rio Ivaí e das Sub-Bacias dos Córregos Jacutinga, Vinte e Um, Horácio e Ribeirão do Rato, para a Execução dos Trabalhos Sedimentométricos com Traçadores Radioativos***. Relatório CDTN / NUCLEBRÁS / ARH. Belo Horizonte, MG.
- WILSON-JR.,G. RODRIGUES, H.T. SANTOS, J.S., 1980. Acervo fotográfico e filmoteco do Noroeste do Estado do Paraná.
- WILSON-JR.,G.,RODRIGUES,H.T.eSANTOS, J.S., 1980. ***Estudos Hidráulicos e Sedimentológicos realizados no Trecho Inferior do Rio Ivaí, Noroeste do Estado do Paraná. OEA: Projeto Hidrologia***. CDTN, ARH, SVOP. Paraná. Brasil.
- WILSON-JR., G.,VUKMIROVIC', V., 1980. ***Estudos Hidráulicos e Sedimentológicos realizados no Trecho Inferior do Rio Ivaí, Noroeste do Estado do Paraná. OEA: Projeto Hidrologia***. CDTN, ARH, SVOP. Paraná. Brasil.
- WILSON-JR., G.,VUKMIROVIC', V., 1980. ***Sediment Transport on the Ivaí River, Brazil***.In: Symposium on River Engineering and as Interaction with Hydrological and Hydraulics Research, IARH, Belgrado, Iugoslávia.
- WILSON-JR.,G., 1987. ***Etude du Transport et de la Dispersion des Sédiments entant que Processus Aléatoires***. Tese apresentada para a obtenção do grau de "Docteur d'Etat ès Sciences Physiques". 419p. Universidade de Paris VI, França.
- WILSON-JR.,G., 1999. ***Estudo do Movimento Sedimentar em Escoamentos com Superfície Livre***. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- WILSON-JR, G, PAIVA, L.E., 2003. ***Estimativa da descarga sólida por arraste a partir do registro das configurações de fundo: aplicação ao Córrego Horácio, noroeste do estado do Paraná***. Artigo apresentado no XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos .ABRH. Curitiba, Brasil.
- WILSON-JR.,G., 2003. ***Movimento de Sedimentos nas sub-bacias: Caso do Córrego Horácio, Brasil***. Artigo apresentado no Congresso Latino-americano de Hidrologia, Argentina.
- WILSON-JR.,G., 2009. ***Evolução Morfológica de Trechos Hidroviários***. VI SOBENA. 15 p. Rio de Janeiro, RJ.
- WILSON-JR.,G., 2010. ***Notas de Aula da Disciplina: Tópicos Especiais em Engenharia de Sedimentos***. Programa de Engenharia Oceânica. COPPE/UFRJ. RiodeJaneiro, RJ
- WOOD, A., AUGUSTIN, N.,2002, ***GAMs with integrated model selection using penalized regression splines and applications to environmental modeling***. Ecological Modelling, Vol. 157, Issues 2-3, Pag 157-177.