

LABORATÓRIO DE RADIOISÓTOPOS

*UTILIZAÇÃO DE TRAÇADORES RADIOATIVOS NO ESTUDO
SEDIMENTOLÓGICO DA BARRA DE RIO GRANDE.*

INSTITUTO DE PESQUISAS RADIOATIVAS

1973

9

EQUIPE
LABORATÓRIO DE RADIOISÓTOPOS
INSTITUTO DE PESQUISAS RADIOATIVAS

Pedro Edmundo Aun
Jefferson Vianna Bandeira
José Carlos Marques
Geraldo Wilson Júnior
Angelo Alberto Maestrini
Matheus Eustáquio da Silveira
Antonio Fioravante Neto
José Joaquim Lima de Campos
Ricardo da Silva Gomes
Fábio Antonio da Silva

CONSULTORIA

Victor Freire Motta
(INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS)

François Anguenot
(COMISSARIAT À L'ENERGIE ATOMIQUE, SACLAY)

RESUMO

É apresentado o trabalho com traçadores radioativos, realizado pelo Laboratório de Radioisótopos, do Instituto de Pesquisas Radioativas, na Barra de Rio Grande, RS.

O traçador radioativo ($1,5\text{Ci}$ de Iridio-192) foi injetado em 24 de Janeiro de 1973 e seguido em 3 campanhas de detecção:

24 de Janeiro a 10 de Fevereiro

19 de Março a 4 de Abril

5 de Maio a 7 de Junho

O espalhamento do material de fundo foi seguido por um detector, arrastado sobre o fundo por um barco, que transporta também o equipamento eletrônico utilizado.

Foram realizadas também algumas medidas de velocidade de corrente e de amplitude, direção e período de ondas, pelo pessoal do DNPVN.

Constatou-se a existência de 2 períodos distintos de transporte, um se prolongando desde a injeção até 30 de Março e o outro cobrindo a época em que ocorreram as primeiras tempestades de outono. O 1º período se caracteriza por fracas intensidades de transporte ($0,2 \text{ t/m.dia}$), orientados no sentido do largo. A ocorrência dos primeiros temporais causou intensa movimentação do material, que se espalhou por toda a região da barra. Pode-se afirmar que este movimento está condicionado à presença de ondas com alturas máximas superiores a $2,0\text{m}$, à profundidade de 12 metros . Caracteriza-se, portanto, que a movimentação de material sobre a barra está ligada diretamente à ocorrência de tempestades. Em vista disso, é lícito esperar que o volume anual de assoreamento do novo canal de acesso permanecerá abaixo dos limites aceitáveis.

ÍNDICE

UTILIZAÇÃO DE TRAÇADORES RADIOATIVOS NO ESTUDO SEDIMENTOLÓGICO DA BARRA DE RIO GRANDE.

	<i>Página</i>
1. INTRODUÇÃO	
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	2
2. TRABALHO DE CAMPO	
2.1. Fase Preparatória	6
2.2. Injeção e Detecção de Localização	9
2.3. A 1 ^a Campanha de Detecção	10
2.4. A 2 ^a Campanha de Detecção	12
2.5. A 3 ^a Campanha de Detecção	12
3. A ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS	
3.1. Correção do Ruído de Fundo Natural	14
3.2. Correção do Decaimento	14
3.3. Correção das Variações de Velocidade do Barco	15
3.4. Correção da Inclinação das Linhas de Detecção	15
3.5. O Diagrama de Transporte	16
3.6. As Curvas de Iso-Contagem	17
4. RESULTADOS	
4.1. Medidas com Traçadores Radioativos	19
4.2. Medições Hidráulicas em Rio Grande	23
5. CONCLUSÕES	32
6. AGRÁDECIMENTOS	35

UTILIZAÇÃO DE TRAÇADORES RADIOATIVOS NO ESTUDO
SEDIMENTOLÓGICO DA BARRA DE RIO GRANDE.

1. INTRODUÇÃO.

1.1. ANTECEDENTES.

O trabalho realizado pelo Laboratório de Radioisótopos do Instituto de Pesquisas Radioativas na região da barra de Rio Grande faz parte de uma série que está sendo realizada em vários portos brasileiros, em colaboração com o Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH) do Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis (DNPVN). Nestes trabalhos, o Laboratório de Radioisótopos se encarrega da utilização de traçadores radioativos e da análise geral, e o INPH da obtenção dos dados hidráulicos e hidrológicos necessários a uma completa interpretação dos resultados.

Também participa desta série de trabalhos, fornecendo consultoria sobre problemas específicos de hidráulica de costas e estuários, o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

No trabalho da barra de Rio Grande participaram, além disso, a 8ª Diretoria Regional do D.N.P.V.N. e a Inspeção Fiscal do Porto de Rio Grande, que se encarregaram da elaboração da infra-estrutura necessária às medidas de campo. O Departamento Estadual de Portos, Rios e Canais (DEPRC) também colaborou, fornecendo serviços de apoio e locais para trabalho.

Um estudo típico utilizando traçadores radioativos consiste na injeção de material marcado com um radioisótopo, na região a estudar, seguida pelo acompanhamento de sua dispersão por meio de detectores arrastados sobre o fundo. Os dados obtidos permitem determinar as direções e velocidades de movimentação do material de fundo e, em geral, calcular a vazão sólida de arraste, por meio de um método conhecido como "método do balanço de traçadores".

A necessidade de se conhecerem estes valores por períodos longos de tempo obriga, em geral, à realização de várias detecções, que são repetidas enquanto a dispersão do material e o decaimento radioativo o permitem. A extrapolação dos resultados experimentais para períodos ainda mais longos demanda a existência de dados hidráulicos e hidrológicos completos, cobrindo o período de um ano. Esses dados condicionam também a qualidade da interpretação dos resultados, que será tanto melhor quanto mais dados convencionais forem conhecidos.

1.2. OBJETIVO.

A análise histórica da embocadura lagunar de Rio Grande revela que a barra formada ao largo das extremidades dos molhes resultou do descarregamento, naquele local, de um grande volume de areia erodido entre aquelas estruturas, durante sua construção, por não se ter procedido a qualquer dragagem prévia ("Relatório - Diagnóstico sobre a Melhoria e o Aprofundamento do Acesso pela Barra de Rio Grande", IPH da UFRGS, Porto Alegre, 1969). Tal volume de

quatorze milhões de metros cúbicos, erodidos e descarregados ao largo entre 1913 e 1919, dos quais dez milhões só em 1914, superou certamente de muito o volume anual que as ondas e correntes, agindo na região, podem transportar. A construção dos molhes destruiu a antiga barra instável que até então se formava mais perto da linha de costa, como resultado da interação entre as capacidades de transporte das ondas em direções normal e paralela à costa e a capacidade de transporte dos escoamentos através da embocadura. Entretanto, a erosão e o depósito acima mencionados acarretaram a formação da nova barra, mais ao largo, que por sua vez proporcionou más condições náuticas de acesso ao porto. Estas consistiam sobretudo em os navios serem obrigados a percorrer curvas com raios inferiores a 500 metros entre a nova barra e as extremidades dos molhes.

A dragagem de canal de acesso com 12 metros de profundidade e raio de cerca de 800 metros em 1961-62, através da extremidade leste da barra, melhorou tal situação. Entretanto, o aprofundamento do canal de acesso para 14 metros torna o porto capaz de ser frequentado por navios com até 260 metros de comprimento, o que exige raio de curvatura de pelo menos 2600m. Apareceu assim a necessidade de dragar novo canal de acesso através da barra e, por conseguinte, de estudar da maneira mais direta possível a mobilidade dos sedimentos sobre a atual barra de Rio Grande, a fim de avaliar, pelo menos qualitativamente, a dragagem de manutenção que será necessária para o novo canal.

Com efeito, antes da experiência que constitui o objeto do presente relatório, dispunha-se de indicações contraditórias a cerca da intensidade do transporte de sedimentos sobre a barra de Rio Grande. Por um lado, havia pelo

menos três motivos para concluir pela fraca intensidade de tal transporte no conjunto do ano:

- a) o fato de a barra atual ter-se formado, da maneira já exposta, ao largo da zona de arreben-tação e, portanto, em local em que o mecanismo do transporte por ondas é diferente dos que atuam na zona de arreben-tação e conduz a ordens de grandeza muito inferiores para os volumes transportados;
- b) o fato de já se saber que as únicas correntes atuando sobre a barra são os escoamentos através da embocadura, que se dispersam logo para fora dos molhes, e correntes de vento que, por seu caracter esporádico e baixas velocidades, tem efeitos desprezíveis sobre os fundos;
- c) o fato de o depósito no canal dragado em 1961-62 ter sido pequeno, da ordem de 120 000 metros cúbicos, de janeiro de 1963 a outubro de 1967.

Por outro lado, cubaturas efetuadas com base nos levantamentos anuais efetuados de 1919 a 1956 indicavam variações anuais de volume da barra, acima da isóbata fechada de -8m, que chegavam por vezes a ultrapassar o milhão de metros cúbicos.

Até que ponto tais variações eram reais e não o efeito ilusório de sondagens efetuadas a prumo em zona quase sempre agitada e de plantas a escalas relativamente pequenas (em geral de 1/20000), em que se traçavam as isôba

tas por interpolação entre pontos sondados em número mais ou menos limitado?

O objetivo essencial da experiência consistiu em esclarecer tal dúvida.

Vários motivos tornaram inviável na prática a intenção inicial de efetuar a previsão do volume anual de dragagem de manutenção no novo canal de acesso com 14 metros de profundidade, por meio de modelo matemático do transporte de sedimentos sobre a barra. Tal modelo seria regulado pelos resultados de experiência quantitativa com traçadores radioativos. Este objetivo exigiria o registro das características de ondas ao largo de Rio Grande durante um ano inteiro, uma vez que a duração da experiência com traçadores não poderia ultrapassar alguns meses. O primeiro de tais motivos foi a necessidade de acelerar o aprofundamento do acesso ao porto, em vista do programa de corredores de exportação. Em consequência, a experiência se efetuou quando a dragagem do novo canal de acesso já se achava em vias de terminar e não foi possível utilizar os resultados para a própria escolha do traçado do novo canal de acesso. Outro motivo foi a falta de aparelhagem disponível para registro de ondas, o que obrigou a que, até mesmo durante a experiência, só se pudesse recorrer a observações visuais de ondas, com todos os inconvenientes que às mesmas se associam. Finalmente, o fato de a movimentação dos sedimentos sobre a barra só se haver praticamente iniciado e se dirigido para o canal com as primeiras tempestades de outono - quando o isótopo utilizado já estava perto do fim de sua vida útil - impediu que se chegasse a resultado quantitativo de assoreamento no canal, até mesmo para o relativamente curto intervalo de tempo que transcorreu entre as duas últimas detecções.

2. TRABALHO DE CAMPO.

2.1 FASE PREPARATÓRIA.

O material de fundo, na região da barra, é constituído por areia fina, fig. 1. Para simulá-lo, resolveu-se utilizar vidro moído, marcado com irídio, com a granulometria representada em linha pontilhada na fig. 1. Este material é produzido especialmente para a simulação de areia em trabalhos com traçadores radioativos, pela Cia. Saint Gobain, França. A massa a ser injetada foi calculada em 530 g e o material foi irradiado no reator de São Paulo. O radioisótopo utilizado no trabalho foi o irídio-192, emissor gama, com meia-vida de 74 dias.

Durante a fase preparatória, foi também projetado e executado um novo tipo de injetor, fig. 2, bem como um sistema para manuseio do injetor à distância, após seu carregamento com o material radioativo.

O injetor é descido ao fundo suspenso, por um cabo, em F. A tração do cabo mantém o injetor fechado durante a descida. Ao atingir o fundo, o peso P atua sobre uma alavanca e abre o injetor, depositando o material nele contido.

O novo sistema de injeção exigiu também o projeto e a execução de uma nova blindagem, utilizada para o transporte, homogeneização e manuseio do material radioativo.

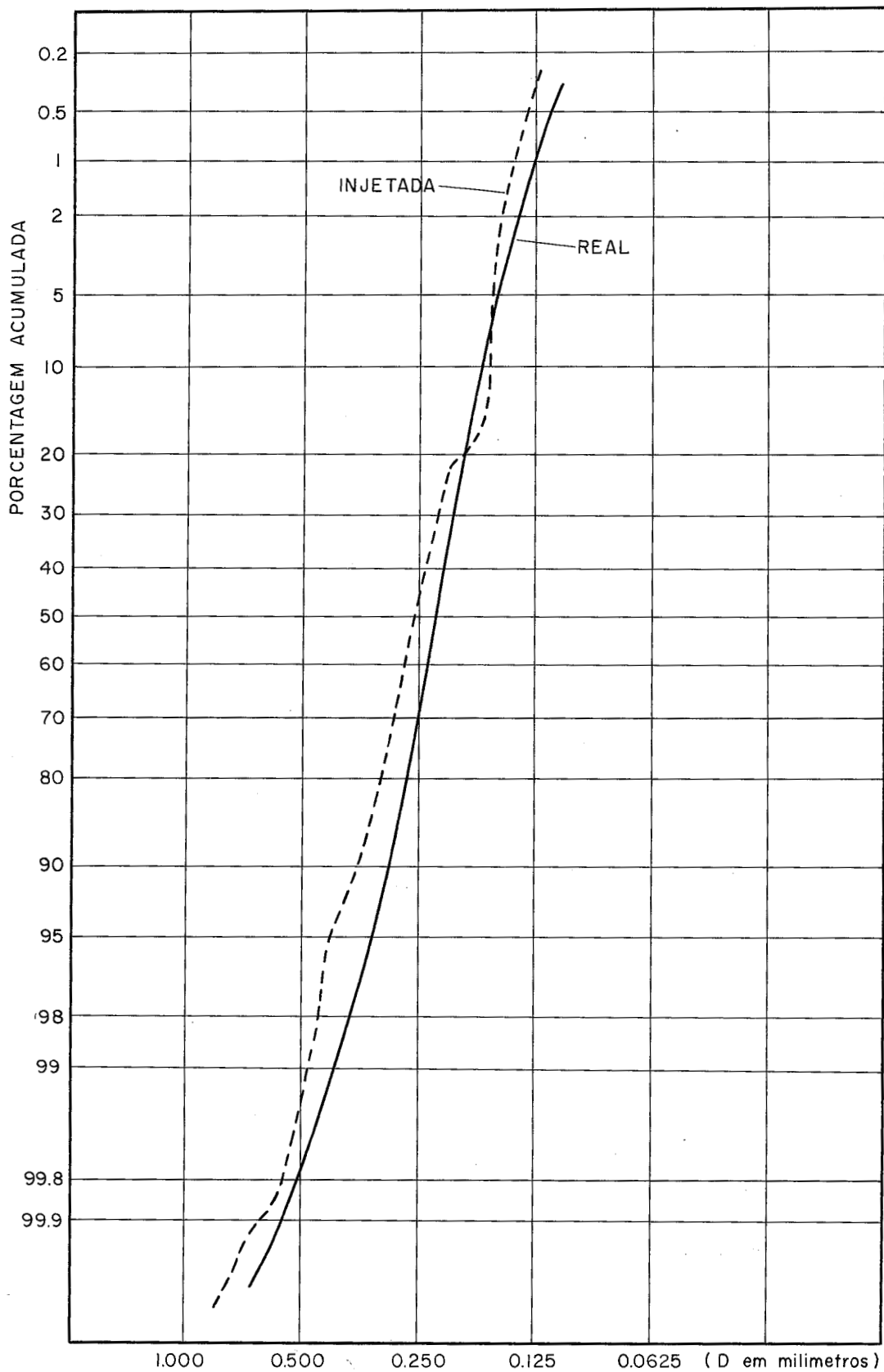


FIGURA 1

CURVA GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL
DA BARRA E DO SEDIMENTO INJETADO

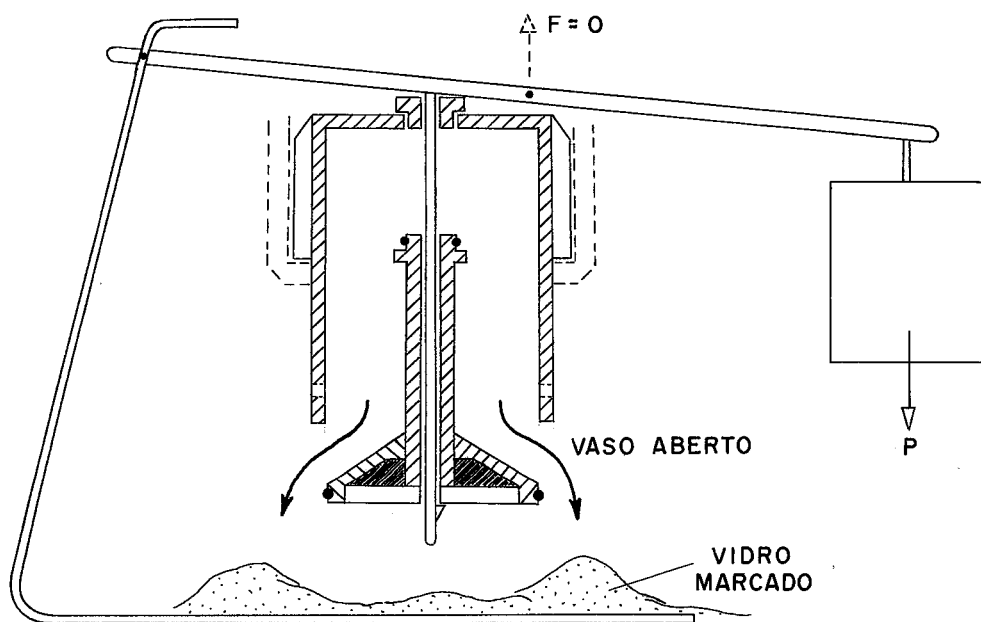
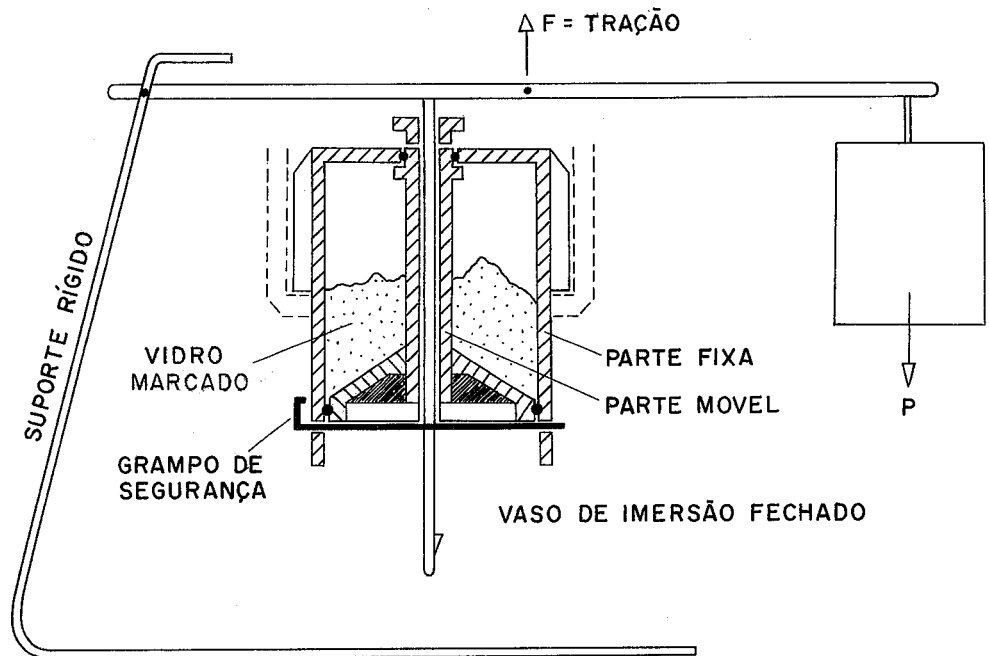


FIGURA 2 - INJETOR

2.2. INJEÇÃO E DETECÇÃO DE LOCALIZAÇÃO.

A partida de Belo Horizonte deu-se no dia 17 de Janeiro, chegando-se à Rio Grande no dia 19, à tarde. Os dias seguintes foram ocupados em

1. Selecionar o barco, escolhendo-se a lancha "Riograndina", com cerca de 12m de comprimento e 2,5 de boca, com excelentes condições para a instalação do equipamento e para a coordenação do trabalho, em vista de dispor de uma cabine bastante espaçosa.
2. Instalação do material a bordo da lancha.
3. Locação das bases de teodolito.
4. Medida da radioatividade natural na região da barra e treinamento da tripulação.
5. Seleção do local da injeção, com participação de especialistas em hidráulica.

Para a injeção, o DEPRC de Rio Grande cedeu o rebocador "Antonio Azambuja", o que permitiu que o trabalho fosse executado sob condições de mar não muito favoráveis. A injeção foi realizada no dia 24 de Janeiro, aproximadamente às 18 horas, com completo sucesso, exatamente no ponto previsto.

No dia seguinte, realizou-se a detecção de localização, cuja finalidade é verificar a qualidade da injeção,

por meio de passagens em torno do ponto de lançamento. Com provou-se a sua boa qualidade, cobrindo o material radioativo apenas uma pequena área em torno do ponto de injeção.

Sob o aspecto de segurança, a abertura do frasco de irradiação, o carregamento do injetor, a homogeneização do traçador e a tomada de amostras foram feitas sob proteção de blindagem de chumbo. A retirada do injetor da blindagem e o seu lançamento ao mar foram executados à distância, por meio de dispositivos especiais. Deste modo, a dose de radiação recebida pelos técnicos que participaram do trabalho foi muito pequena e dentro dos limites permitidos.

2.3. A PRIMEIRA CAMPANHA DE DETECÇÃO.

Entre o dia 27 de Janeiro e o dia 10 de Fevereiro, foram realizadas 4 detecções completas e de boa qualidade. Elas foram executadas nos dias 27 de Janeiro, 1º, 5 e 9 de Fevereiro, durando, cada uma, cerca de 8 horas.

Uma detecção consiste em cobrir toda a nuvem radioativa por meio de trajetórias paralelas, afastadas entre si de cerca de 30m. O material radioativo é detectado por meio de uma sonda, presa a um trenó (Fig. 3), que é rebocado, através do fundo, pelo barco. Os dados obtidos em uma detecção são analisados pela aplicação do método do balanço de traçadores, apresentado no anexo 1. O equipamento utilizado foi o seguinte:

- Detectores de cintilação SRAT, tipo SPP3, sonda com cristal de NaI(Tl), de 1" x 1 1/4".

- . Contador de pulsos Hewlett Packard 5201L.
- . Registrador gráfico bi-canal Moseley 7100BM
- . Impressora Hewlett Packard 562A

O conjunto acima era alimentado por um gerador a gasolina Honda, de 1500 W, controlado por um quadro contendo um voltímetro, um amperímetro e um frequencímetro.

Além disso, foi utilizado em todas as detecções um eco-batímetro Raytheon, alimentado a bateria.

O trenó que transporta a sonda é lançado e recuperado por meio de um guincho, movido por um motor a gasolina. Finalmente, a comunicação entre os barcos e a rede de teodolitos que executa a triangulação é assegurada por um conjunto de radios-transmissores Tokay ou Evadin, de 5w de saída. Este sistema permite localizar a posição do barco em intervalos de 30 segundos. O intervalo de tempo entre as detecções foi determinado em função do movimento observado do material radioativo, que era pequeno. Como é indicado em casos de pequena movimentação, ao término da 1^a campanha foi estabelecida a necessidade de uma 2^a série de medidas a ser realizada no mês de Março. Além de se conseguirem informações representativas de um período maior de tempo, a 2^a campanha pode incluir, em sua análise, dados sobre ondas e correntes, os quais não foram coletados durante a primeira parte do trabalho, por várias dificuldades.

2.4. A SEGUNDA CAMPANHA DE DETECÇÃO.

A segunda campanha foi realizada entre os dias 19 de Março e 4 de Abril, também com completo sucesso. O equipamento experimental foi o mesmo descrito anteriormente. Foram realizadas 3 detecções, em 24, 26 e 30 de março, sob boas condições de navegação.

Durante todo o período entre a 1^a e a 2^a campanhas, os técnicos da Inspeção Fiscal de Rio Grande realizaram medidas de altura, direção e período de ondas, utilizando como referência um mastro de ondas, ancorado na região de trabalho. Além disso, durante a 2^a campanha, foram coletados dados sobre correntes, pela equipe enviada a Rio Grande pelo INPH.

Entretanto, devido às condições de bom tempo reinantes desde a realização da injeção, não se pode determinar ainda se o pequeno movimento do material de fundo encontrado é devido às condições meteorológicas favoráveis ou ao fato de ser a barra fóssil. Foi, por isto, proposta e aceita uma 3^a campanha de medidas, a ser realizada em Maio.

2.5. A TERCEIRA CAMPANHA DE DETECÇÃO.

A terceira campanha de detecções cobriu o período entre 5 de Maio e 7 de Junho, sendo realizadas duas detecções completas e coletados dados sobre ondas e correntes. Esta fase se caracterizou pela ocorrência de temporais no seu início, com fortes ventos do quadrante sul e ondas de

altura acima de 2 metros. Aparentemente, estes temporais causaram o espalhamento do material por uma área bastante grande, obrigando que cada detecção cobrisse vários dias. O material espalhou-se, inclusive pela região de vasa que circunda a barra, o que trouxe problemas à detecção: a atividade restante era, em geral, da mesma ordem que o ruído de fundo na região de vasa. Para determinar o tipo de fundo, tomaram-se frequentes amostras, que serviram para limitar o comprimento útil das linhas de detecção. Aparentemente, houve perda de material radioativo, seja para a região de vasa, seja para o canal, o que torna impossível a aplicação do "método do balanço" para determinar a vazão sólida de arraste.

Estes problemas foram devidos, principalmente, ao longo tempo decorrido entre a injeção e a terceira detecção, restando pouco material radioativo na região da barra. Entretanto, as informações obtidas foram essenciais para a interpretação dos resultados, já que as detecções anteriores mostraram uma movimentação de fundo pequena e com a direção geral do largo. A terceira detecção, pelo contrário, mostrou uma movimentação bastante intensa, com uma componente na direção do canal. Para a obtenção de resultados quantitativos, seria necessária uma nova injeção em período de inverno, realizando-se uma detecção logo após um temporal. Além disso, seria necessária a utilização de um ondógrafo e de um correntógrafo, já que observações de ondas e correntes, com o equipamento disponível (mastro de ondas e correntometro) é inteiramente impossível sob condições de temporal.

3. A ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS.

Os dados brutos coletados durante as campanhas de medida sofrem várias correções, para utilização posterior:

3.1. CORREÇÃO DO RUIDO DE FUNDO NATURAL.

O ruído de fundo, isto é, o número de contagens detetado na região em estudo, antes do lançamento do traçador, é pequeno e constante em fundos de areia. Em vista disso, adotou-se como ruído de fundo o valor da contagem obtido em linhas de detecção que passam por regiões sem atividade. Este valor é subtraído de todas as contagens detetadas.

3.2. CORREÇÃO DE DECAIMENTO.

O irídio 192 tem a meia vida de 74,4 dias, o que quer dizer que, neste período, sua atividade decresce para a metade do valor inicial. As contagens obtidas após um tempo t decorrido desde a injeção são corrigidas pela fórmula

$$A = A_0 e^{-\frac{0,693t}{T}}$$

onde A é a atividade no tempo t
 A_0 é a atividade no dia da injeção
 T é a meia vida

3.3. CORREÇÕES DAS VARIAÇÕES DE VELOCIDADE DO BARCO.

Como já foi dito, procura-se realizar a detecção segundo linhas paralelas, percorridas a uma velocidade constante. Como isso é impossível, as detecções são reduzidas para uma velocidade do barco de 1 m/s. Esta correção consiste em multiplicar a velocidade do barco, entre 2 posições consecutivas, dadas por triangulação, pelo valor da contagem obtida naquele trecho.

3.4. CORREÇÃO DA INCLINAÇÃO DAS LINHAS DE DETECÇÃO.

Apesar de todos os cuidados, há desvios nas trajetórias do barco, que não são paralelas umas às outras. Este desvio é corrigido multiplicando-se a contagem em cada trecho pelo coseno do ângulo que o trecho faz com a perpendicular à direção de transporte. A direção de transporte, no caso de Rio Grande, foi definida como a melhor reta perpendicular às direções de detecção, sendo o ajuste feito pelo método dos mínimos quadrados.

Após as correções acima, as contagens obtidas em cada linha são somadas; o valor obtido é utilizado na construção do diagrama de transporte.

3.5 O DIAGRAMA DE TRANSPORTE.

O diagrama de transporte é obtido fazendo-se corresponder a contagem total corrigida de cada linha (em cps x m) à posição dada pela intercessão da linha com a direção de transporte. A área deste diagrama (cps x m²) fornece o valor de N, contagem total detetada, que é utilizado no cálculo da espessura E de transporte. O seu centro de gravidade representa a posição do centro de gravidade da nuvem radioativa.

As posições dos centros de gravidade da nuvem, em duas deteções consecutivas, permitem determinar a velocidade V_m de movimentação do traçador, valor este que é também necessário ao cálculo da vazão sólida Q. Esta é determinada, em geral, pela expressão

$$Q = \rho V_m L E,$$

onde V_m e E já foram definidos, ρ é a densidade aparente do material de fundo e L é a largura da região onde existe transporte.

Em resumo,

- i. A área do diagrama de transporte fornece o valor de N (cps x m²).

- ii. O valor de N é utilizado para o cálculo da espessura E de transporte, conforme é mostrado no anexo 1.
- iii. As posições consecutivas do centro de gravidade da nuvem radioativa fornecem a velocidade média de transporte, V_m .
- iv. Para calcular a vazão de material de fundo, aplica-se a expressão

$$Q = \rho V_m L E.$$

adotando-se, em geral, para L , o valor de 1 metro.

Todos os cálculos acima descritos são executados em uma calculadora programável Hewlett Packard, utilizando programas desenvolvidos pelo Laboratório de Radioisótopos. Estes programas permitem que, 48 horas após o término de uma detecção, já se conheçam os valores dos parâmetros mais importantes para o trabalho, o que é essencial para o planejamento da detecção seguinte.

3.6 AS CURVAS DE ISO-CONTAGEM.

Outro modo de apresentar os resultados é o traçado das curvas de iso contagem. Elas são obtidas localizando

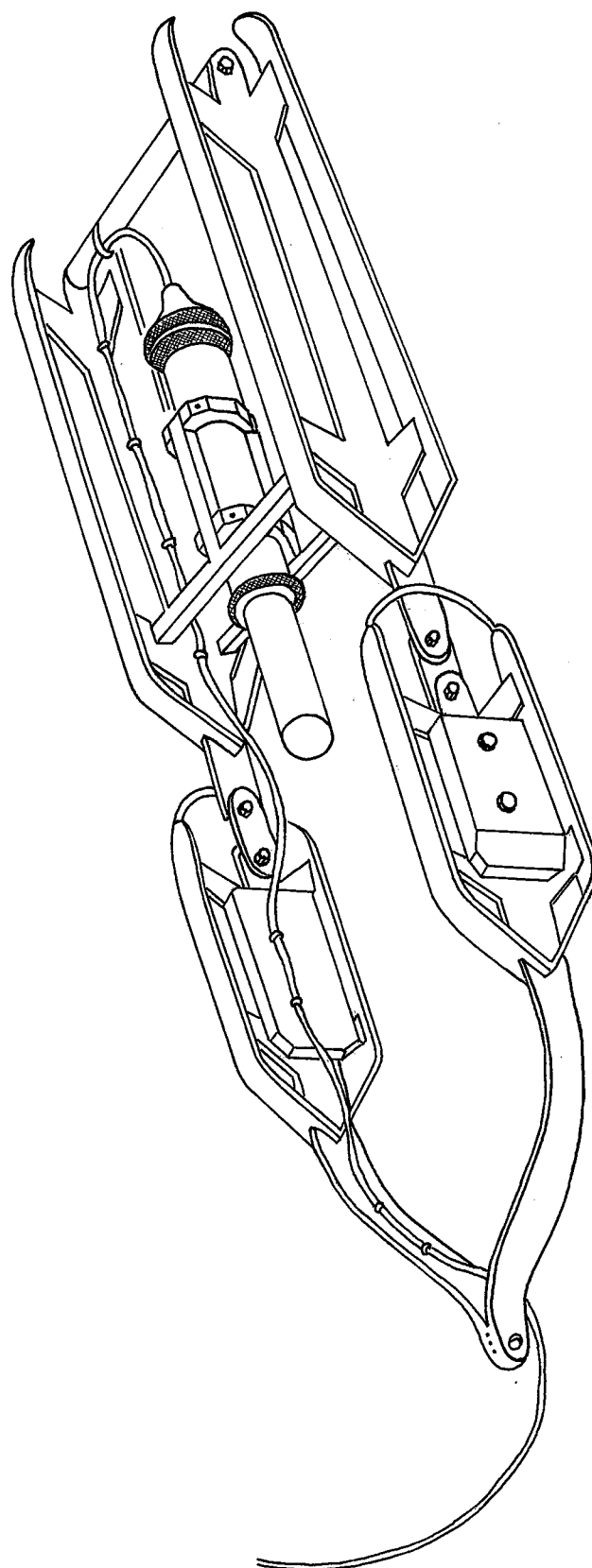


FIGURA 3
TRENÓ DE RASTREAMENTO

do-se cada ponto de contagem no mapa da área em estudo e fazendo-se corresponder, a cada ponto, a taxa de contagem nele obtida. Os valores utilizados para a contagem devem sofrer apenas correções de ruído de fundo e decaimento. Em seguida; une-se, por uma linha contínua, todos os pontos que apresentam a mesma contagem. Estas curvas são importantes para a visualização do espalhamento do traçador na área em estudo.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.

4.1. MEDIDAS COM TRAÇADORES RADIOATIVOS.

Os dados coletados durante o trabalho de campo são resumidos nas figuras RGB 01 a 09, que representam as curvas de iso-contagem obtidas na área em estudo. Nelas, estão representados os resultados obtidos em 6 segundos de contagem, o intervalo de tempo utilizado durante a detecção.

Além disso, a figura RGB 10 mostra a evolução do material de fundo, marcado com o traçador, no decorrer das 2 campanhas iniciais, incluindo-se a localização das bases de teodolito. É também apresentada, na figura RGB 17, a evolução da curva de 600/700 contagens, no decorrer do tempo, com a finalidade de facilitar a visualização do espalhamento da nuvem radioativa. A comparação das curvas iniciais, entre 27 de Janeiro e 30 de Março, mostra que o material de fundo movimentou-se pouco neste período. Nesta época, o tempo manteve-se relativamente estável em Rio

Grande, sem que ocorressem tempestades ou ventos fortes. O regime de escoamento predominante foi o de vasante, havendo apenas correntes fracas de fundo, constatadas em medidas a correntôgrafo.

A terceira campanha de detecção foi realizada a pós a ocorrência dos primeiros temporais de outono, que obrigaram, inclusive, a um retardamento do início do trabalho de campo. As curvas de iso-contagem, obtidas para os primeiros dias de junho, mostram em quadro inteiramente diferente. O material marcado espalhou-se por toda a região da barra, surgindo também uma componente de movimento na direção do canal. O espalhamento foi tão intenso que, em associação ao longo período decorrido desde a injeção, dificultou bastante a análise dos dados. As curvas de iso-contagem apresentam, portanto, um certo grau de incerteza, pois a taxa de contagem medida para o material radioativo corresponde, em média, ao ruído de fundo natural relativo à região de vasa que rodeia o banco. Para erros, coletaram-se amostras de fundo nas regiões julgadas como limites para a presença de material radioativo. Estas amostras foram analisadas por fluorescência de raios X, tentando-se determinar nelas a presença de irídio. As duas únicas amostras em que ele foi detetado correspondem a regiões dentro das curvas de iso-contagem representadas na figura RGB 09, o que indica que os critérios adotados para o traçado das curvas foram razoáveis.

A análise quantitativa da movimentação de material de fundo exige o traçado dos diagramas de transporte, cuja definição é executada a partir de dados digitais, em uma calculadora programável. Os diagramas de transporte para o cálculo do balanço do material radioativo foram basea

dos nas direções de transporte auxiliares, definidas em função das trajetórias percorridas pelo barco, durante as detecções. Como o barco deve navegar perpendicularmente às ondas, a direção de transporte auxiliar independe das direções reais de transporte. Para visualizar o movimento quantitativo do material, foram também traçados os diagramas de transporte, a partir das direções reais de transporte, representados nas figuras RGB 11 a RGB 16.

A área dos diagramas de transporte fornece o valor da contagem total integrada N (em cps \times m²), utilizado no cálculo da espessura de transporte E .

Os resultados são apresentados na tabela 1. Verifica-se que o material injetado ($A = 1,5$ curies) foi-se enterrando progressivamente, com o decorrer do tempo, até a ocorrência dos primeiros temporais. Aparentemente, estes recolocaram todo o material radioativo em movimento, estando ele distribuído quase superficialmente, na última detecção, em princípio de junho. Isto comprova a intensa movimentação de material de fundo sobre a barra, durante a ocorrência de temporais. Apresenta-se, também, na figura RGB 18, a evolução do centro de gravidade da nuvem radioativa no decorrer do tempo. As posições sucessivas do centro de gravidade permitem calcular a velocidade média V_m , entre 2 detecções, apresentada na tabela 1.

Obtidos estes valores, é necessário conhecer ainda, para o cálculo de vazão sólida, os valores da resposta da sonda utilizada para uma atividade conhecida. Como várias sondas foram usadas durante o trabalho, foram adotados valores médios para os coeficientes de calibração:

$$f_0 = 14 \text{ cps}/\mu\text{c}/\text{m}^2$$

$$\alpha = 0,14 \text{ cm}^{-1}$$

Esses parâmetros permitem calcular a vazão sólida de fundo, cujos valores aparecem na tabela 1. A coluna Q_0 apresenta as vazões sólidas de fundo totais entre duas detecções consecutivas, enquanto na coluna Q aparecem os valores médios da vazão, por dia. Verifica-se que, durante o período entre 27/01 e 30/03, a vazão média foi da ordem de 0,2 toneladas por metro linear por dia. A direção do movimento observado não indica que o material da barra se dirija para o canal. Deve ser observado que o valor de N para o dia 24/03 foi de $8,27 \times 10^6 \text{ cps} \times \text{m}^2$, o que confirma o valor obtido na detecção de 26-30/03.

DATA	N $\text{cps} \times \text{m}^2$	E (cm)	V_m (m/dia)	Q_0 (t/m)	Q (t/m.dia)
27/01	2.69×10^7	super.			
			13,5	1,77	0,35
01/02	1.82×10^7	3,2			
			1,27	0,38	0,10
05/02	1.57×10^7	5,9			
			1,82	0,67	0,17
09/02	1.63×10^7	5,3			
			0,84	9,14	0,18
26-30/03	7.87×10^6	21,6			
			-----	-----	-----
03-04-05/6	2.16×10^7	super.			

TABELA 1

O exame da figura RGB 09 mostra que o espalhamento do material radioativo deu-se sobre toda a região da barra, havendo uma componente em direção ao Canal, mas na qual não está concentrada, particularmente, uma grande massa de material radioativo. Por motivos já citados, os dados desta detecção não são suficientemente seguros para a estimativa de vazões de material de fundo. Entretanto, a detecção forneceu um dado essencial: o movimento intenso do material da barra está condicionado à existência de temporais.

4.2. MEDIÇÕES HIDRÁULICAS EM RIO GRANDE.

4.2.1. Introdução.

Durante as campanhas de medições com traçadores radioativos da movimentação da areia na barra de Rio Grande, foram efetuadas medições de corrente e ondas.

Para a medição de ondas foi utilizado um mastro de ondas fundeado à profundidade de 12 metros, sendo as observações efetuadas de um teodolito instalado em uma torre na extremidade do molhe oeste. As observações de direção de ondas foram efetuadas em local próximo ao mastro de ondas. Estas observações foram efetuadas pelo pessoal da Inspetoria Fiscal do Porto de Rio Grande. As medições de corrente foram efetuadas com um correntometro NEYRPIC, pela equipe do INPH nos dias 29, 30 e 31/3 e 2 e 3/4.

4.2.2. Períodos de Observação de Alturas e Direções de Ondas.

1º Período: 19/2 à 3/4 - Foram efetuadas 2 campanhas diárias, às 9 horas e 17 horas. Ao todo foram realizadas 35 campanhas.

2º Período: 14/5 à 4/6 - Foi efetuada apenas uma campanha diária. Foram realizadas apenas treze campanhas de observações neste período devido às precárias condições de acesso à extremidade do molhe oeste, ocasionadas pelas condições de tempo reinantes.

4.2.3. Resultados.

4.2.3.1. Altura de Ondas:

A análise dos dados obtidos pela leitura do mastro de ondas permitiu que se construíssemos histogramas de distribuição de alturas máximas ($H_{\text{máx}}$)-Fig 4-e alturas significativas (H_s)-Fig 5.

Considerou-se a altura significativa H_s de cada campanha como a média aritmética do terço das ondas mais altas observadas em cada campanha.

Estes dois histogramas reúnem as observações dos dois períodos, ou seja: de 19/2 a 3/4 e de 14/5 a 11/6. Observou-se que H_{max} variou de 0,1m a 2,3m, sendo 0,8m o valor mais frequente observado. Isto não significa que a altura máxima de onda que ocorreu entre 19/2 e 4/6 tenha

sido 2,3m. Em ocasiões de tempestade durante este período, certamente ocorreram ondas maiores que 2,3m à profundidade de 12m; mas, como foi dito antes, nas épocas de tempestade a extremidade do molhe oeste se torna inacessível, o que não permitiu observações de ondas.

Pela Fig 5 observou-se que H_s variou entre 0,1m e 1,5m, sendo 0,6m o valor mais frequente.

4.2.3.2. Direção de Ondas.

A Fig 6 mostra que a quase totalidade das ondas observadas entre 19/2 e 4/6 provêm do quadrante sul. Para o cálculo das percentagens, as observações de direção de ondas foram agrupadas em categorias de 5 em 5 graus.

Observou-se que a direção mais frequente é 145° SE com 40,9%. A Fig 7 é um detalhe das observações de direção de baixa porcentagem.

4.2.3.3. Correntes.

Foram poucas as observações de correntes sendo elas efetuadas nos dias 29, 30 e 31/3 e em 2 e 3/4.

Pelas Figuras 8 e 9, observou-se que os valores medidos são geralmente inferiores a 30 cm/s.

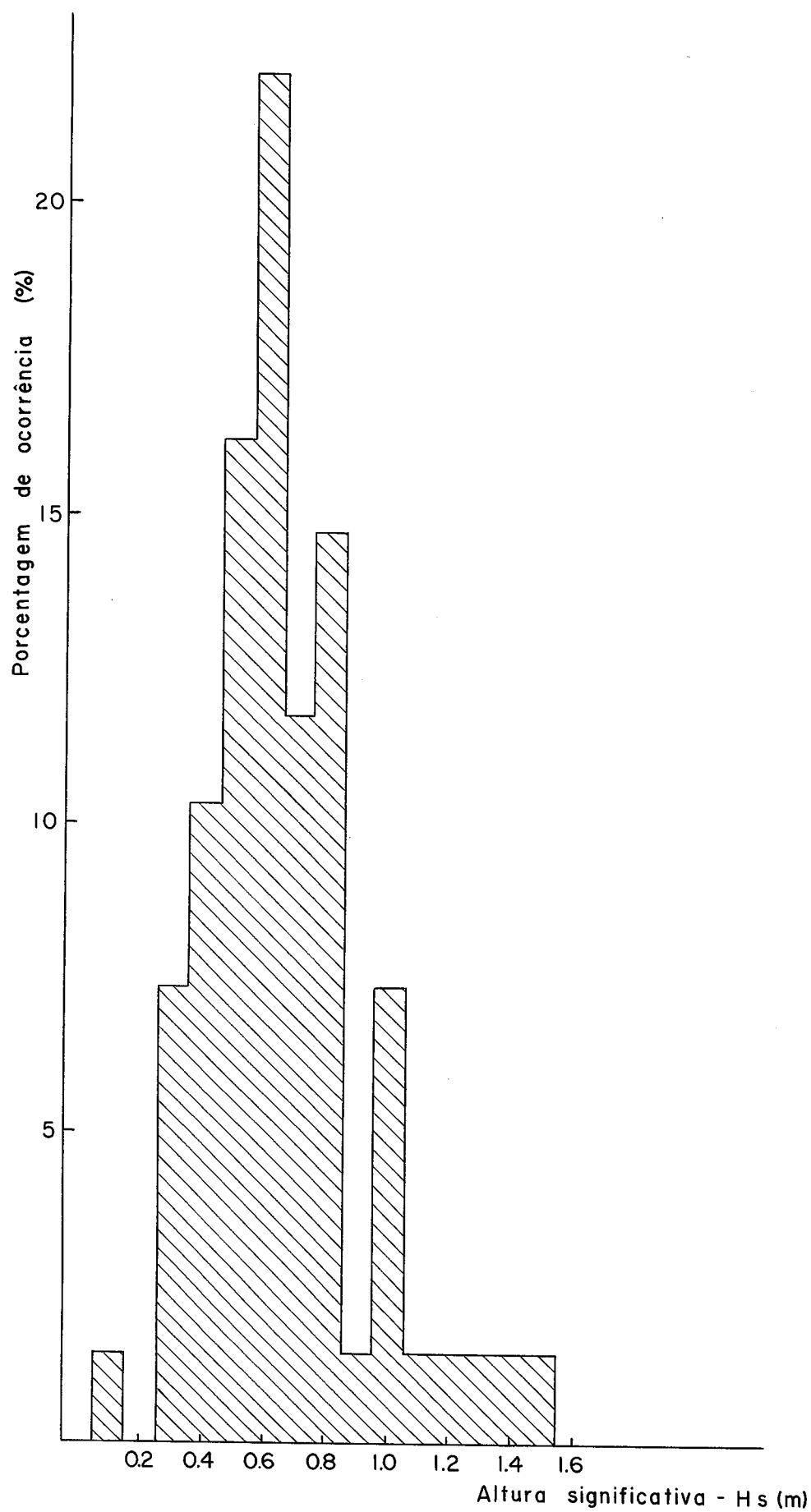


FIG. 5
DISTRIBUIÇÃO DE Hs

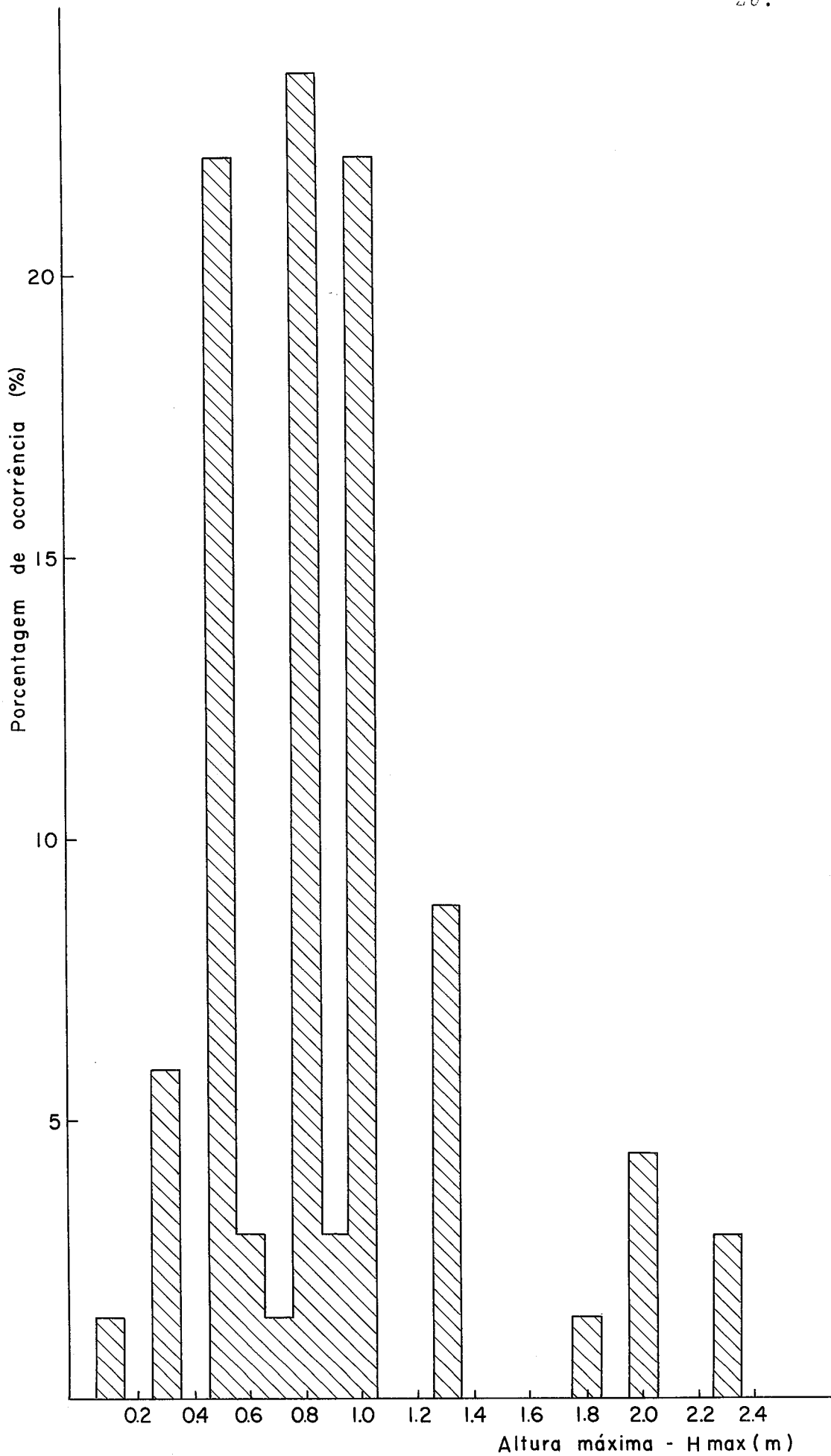


FIG. 4
DISTRIBUIÇÃO DE H max

FIG. 6

FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DE DIREÇÕES DE ONDAS A PROFUNDIDADE DE 12 m, INDEPENDENTEMENTE DE PERÍODOS E ALTURAS - DE FEVEREIRO DE 1973 A JUNHO DE 1973

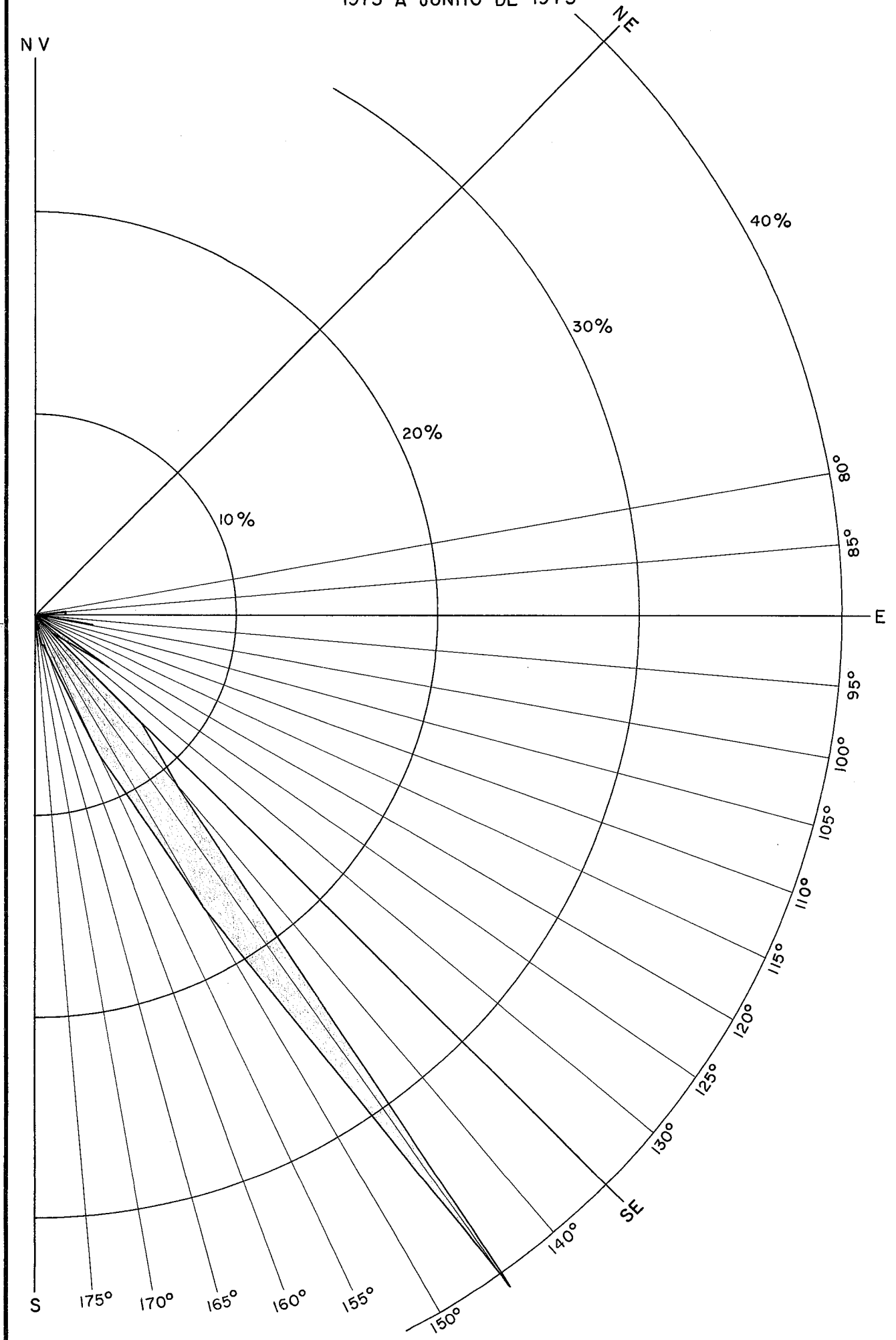
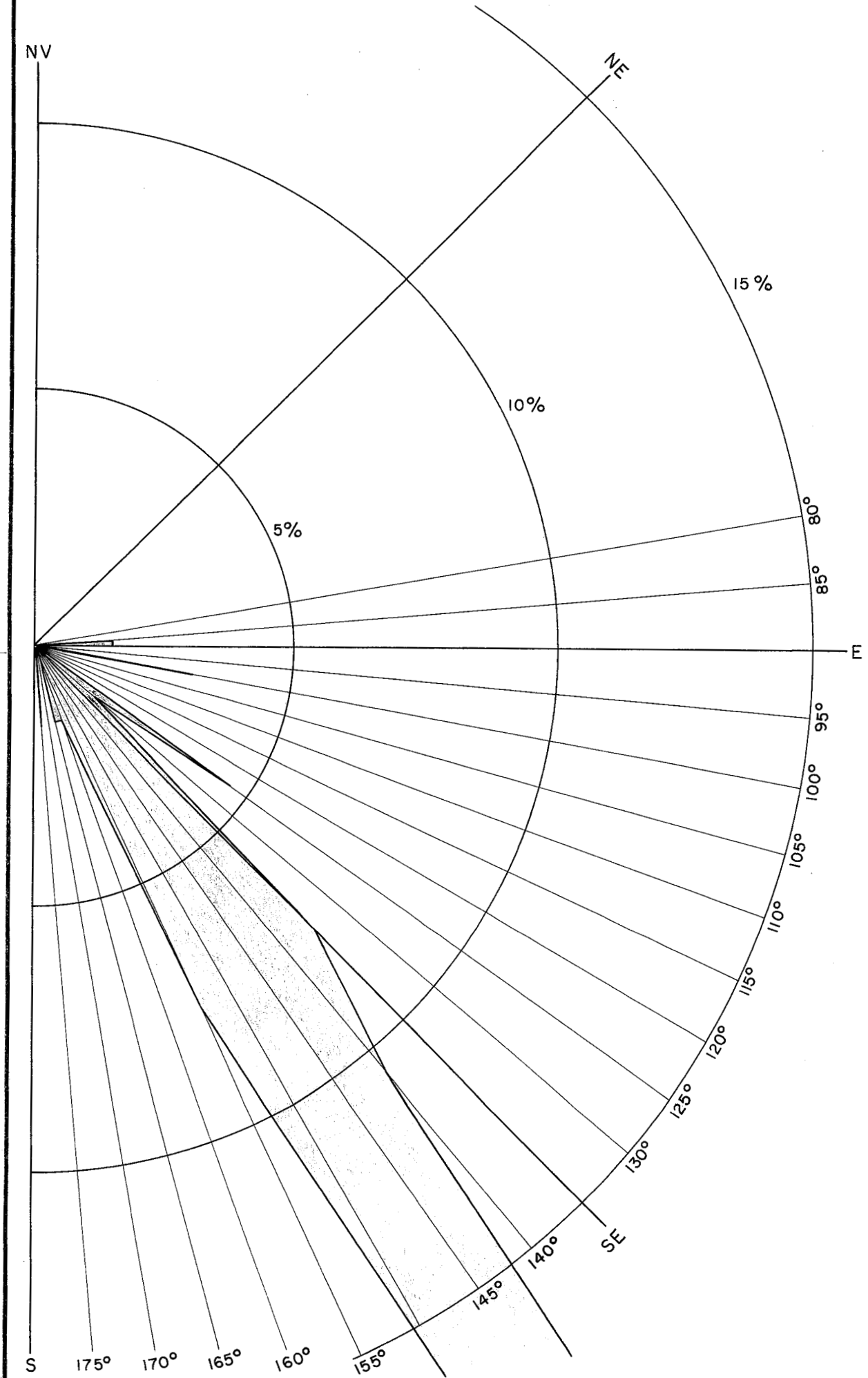
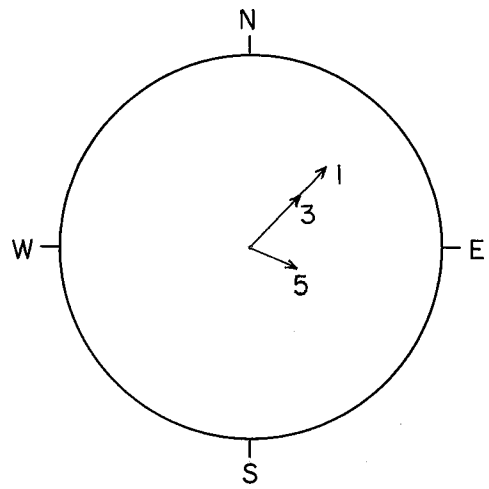
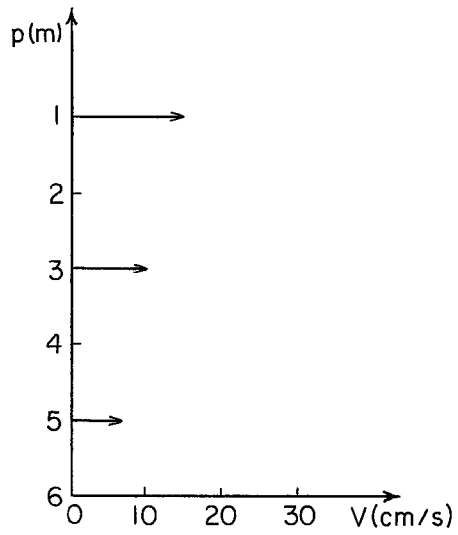


FIG. 7

FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DE DIREÇÕES DE ONDAS (DETALHE)



29/3



30/3

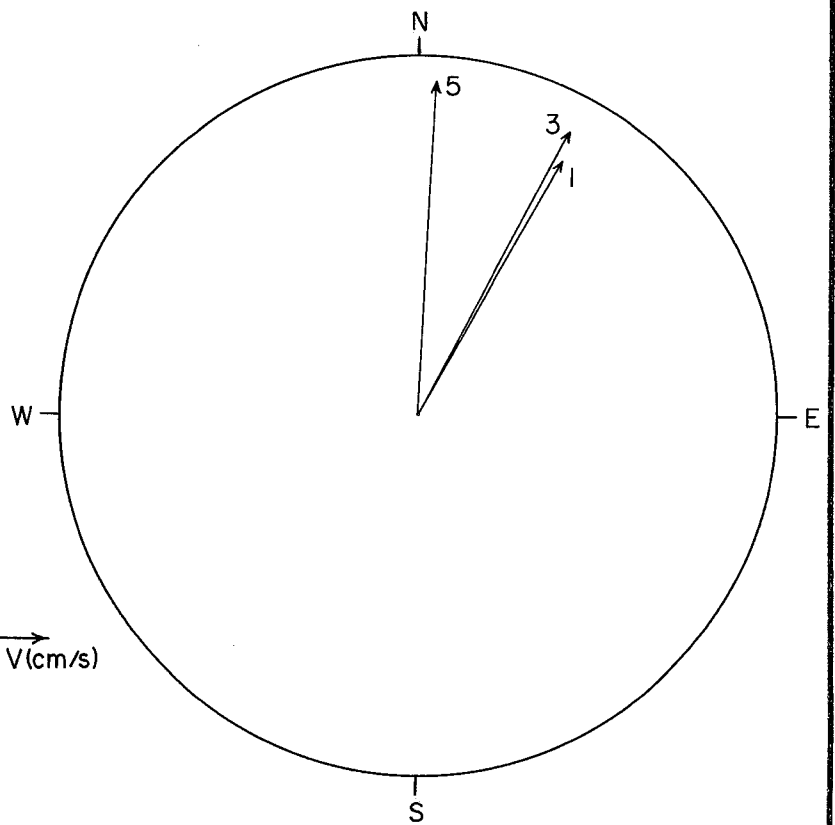
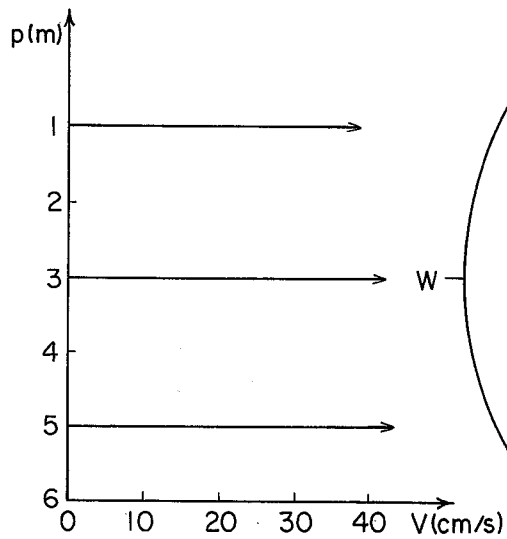
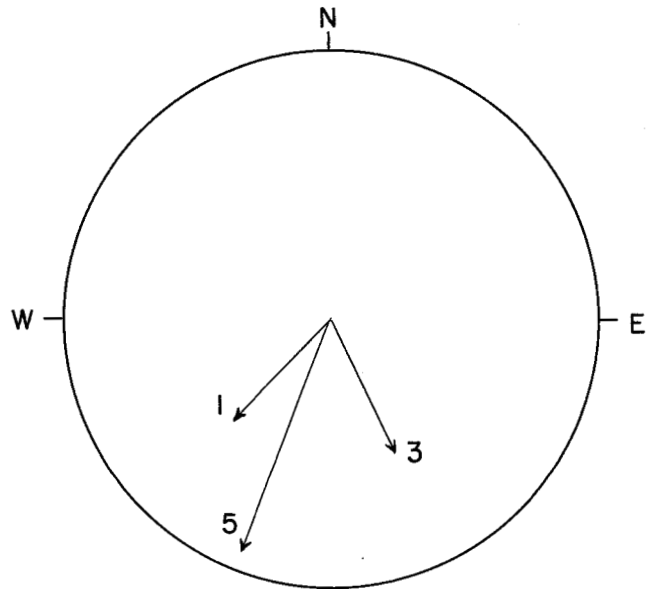
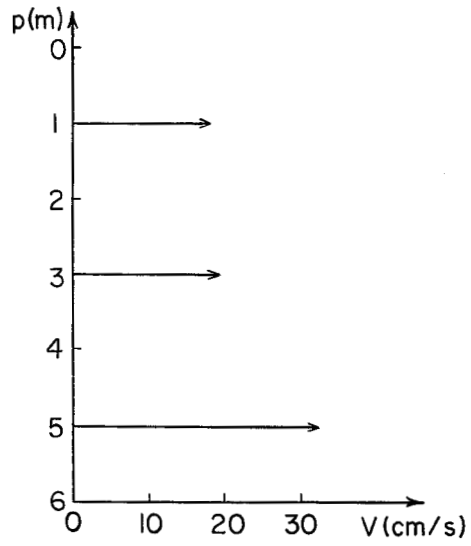
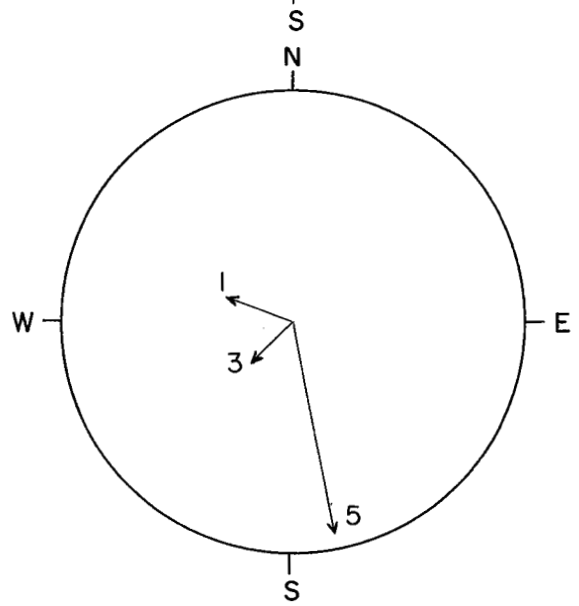
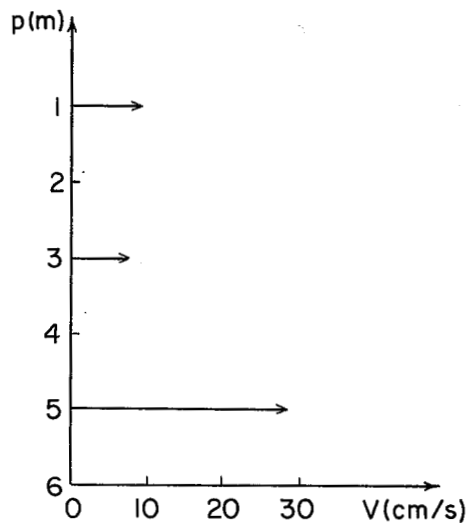


FIG. 8

31/3



2/4



3/4

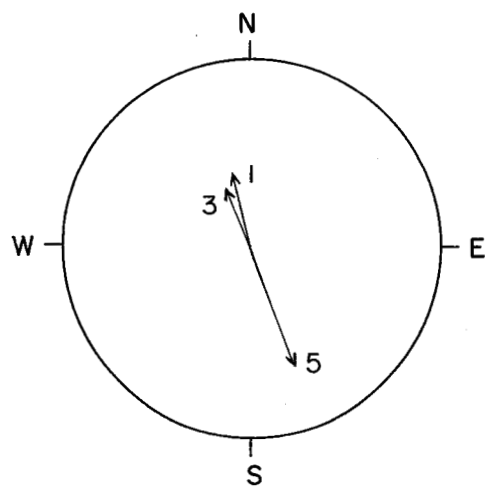
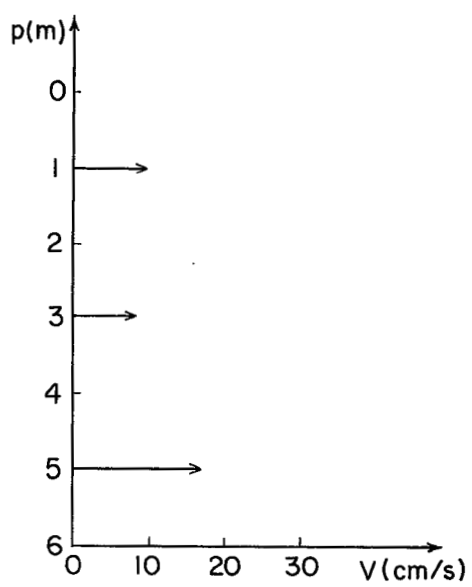


FIG. 9

5. CONCLUSÕES.

5.1. *Constata-se haverem ocorrido dois regimes nitidamente distintos de crescimento da mancha radioativa e, conseqüentemente, de transporte de areia sobre a barra de Rio Grande:*

- a) o que vigorou desde o dia da injeção (24/01/73) até a deteção de 30/03;*
- b) o que passou a reinar depois de 30/03, quando ocorreram as primeiras tempestades de outono.*

5.2. *O regime vigorante de 24/01 a 30/03 se caracteriza por fracas intensidades de transporte. Este se orientou em direção transversal à linha de costa e no sentido para o largo. A isodose de 116 contagens por segundo (700 contagens em 6 segundos) cresceu de cerca de 300 metros, no sentido para o largo, entre as deteções de 09/02 e de 24/3. Durante a primeira campanha de deteção (27/01 a 09/2) o movimento foi praticamente desprezível (deslocamento máximo da ordem de 100 metros para a mesma isodose).*

5.3. *O maior espalhamento do traçador ocorreu entre .. 30/03 e 15/05. A isodose de 100 contagens por segundo foi encontrada a quase 500 metros do ponto de injeção no sentido para NE, tendo portanto se deslocado no mesmo sentido geral do transporte litorâneo - da zona de arrebentação - na costa do Rio Grande do Sul, que se dirige de SW para NE.*

5.4. *Os valores medidos para as correntes (geralmente inferiores a 30cm/s) e os sentidos dos deslocamentos con*

firmam serem as ondas - e não correntes litorâneas (de ma
rê ou de vento) - o agente marinho que transporta sedimen-
tos, no caso em análise.

5.5. Não foi possível determinar quantitativamente uma
vazão sólida média por unidade de largura, em direção ao
canal de acesso, durante o período de 30/03 a 15/05, por
causa da extensão da área sobre a qual se espalhou o traça
dor injetado e porque sua atividade já se havia reduzido a
ponto de não ser possível distingui-la, em algumas zonas ,
da atividade de "background" de bolsões de vasa existentes
na área. A obtenção de resultados quantitativos, nas con
dições que passaram a reinar depois de 30/03, teria exigi
do nova injeção.

5.6. As observações de ondas efetuadas durante todo o
desenrolar da experiência foram apenas visuais - por não
se dispor de registrador - e falharam totalmente em carac
terizar a mudança do regime de ondas, que certamente ocor
reu depois de 30/03, pois não documentaram a ocorrência de
nenhuma tempestade posterior àquela data e a própria equi
pe do IPR assistiu a várias. Basta apontar que aquelas
observações eram efetuadas a partir da extremidade do mo
lhe oeste e tal ponto torna-se inacessível em condições de
tempestade. Sabe-se, porém, do registro de ondas ao largo
de Tramandai, durante um ano, para o projeto do terminal
oceânico da Petrobrás, que a principal variação sazonal
das características de ondas no litoral do Rio Grande do
Sul consiste na maior ocorrência de tempestades durante os
meses de outono e inverno - de abril a setembro. Pode-se,
por conseguinte, afirmar com certeza que a ocorrência das
primeiras tempestades de outono foi a causa do espalhamen

to de traçador observado entre 30/03 e 15/05.

5.7. O sistema geral de transporte de sedimentos sobre a barra, que ressalta dos resultados da experiência, é portanto o seguinte: aquele transporte é insignificante en quanto a altura das ondas não ultrapassa certo limite - que conforme se verá abaixo é relativamente elevado - e se restringe praticamente a ocasiões de tempestade.

5.8. A já mencionada precariedade das observações visuais que se efetuaram das ondas, impede que se defina com razoável precisão o valor crítico de altura de onda, que desencadeia o transporte de sedimentos sobre a barra do Rio Grande. Pode-se afirmar, porém, que tal limite é superior a altura máximas de 2,3 metros e alturas significativas de 1,5 metros, à profundidade de 12 metros, pois observvaram-se tais valores durante o período em que o movimento de sedimentos sobre a barra foi insignificante. Por outro lado, o valor-limiar em questão parece ser inferior ao limite teórico em que as ondas começam a arrebentar sobre a barra ($6.0m/1,3 = 4,6m$). O estudo das ondas para Tramandai revelou que alturas significativas de 4m à profundidade de 20m, que praticamente correspondem à altura significativa de 4,6m à profundidade de 6m para um período de 9 segundos, ocorrem em média uma vez por ano, ao largo do Rio Grande do Sul.

5.9. Em consequência das duas conclusões anteriores, é lícito esperar que o volume anual de assoreamento no novo canal de acesso permanecerá abaixo dos limites aceitáveis.

6. AGRADecIMENTOS.

O Laboratório de Radioisótopos agradece o apoio recebido de toda a equipe técnica do D.N.P.V.N., incluindo o pessoal do I.N.P.H., da 8^a Diretoria Regional e da Inspeção Fiscal de Rio Grande. Deve também ser citada a colaboração prestada pelo DEPRC, que facilitou grandemente a realização do trabalho. Finalmente, deve ser ressaltada a hospitalidade e a gentileza características do povo gaúcho, que foi novamente demonstrada durante os meses que a equipe do Laboratório de Radioisótopos passou em Rio Grande.

A N E X O 1

ANEXO 1

1. O MÉTODO DO BALANÇO DE TRAÇADORES RADIOATIVOS.

1.1. INTRODUÇÃO.

A determinação da vazão mássica de material em movimento no fundo de um rio ou do mar é um problema complexo. A utilização de traçadores radioativos, em sua solução, tem apresentado resultado bastante satisfatório, sendo empregada cada vez mais frequentemente em diversos países.

Um trabalho com traçadores consiste essencialmente em marcar, com um traçador radioativo, uma amostra representativa do material em movimento no fundo, e acompanhar a sua evolução, por meio de um detetor de radiação arrastado por um barco. Outra alternativa é simular o material de fundo por meio de vidro moído, na granulometria necessária, ao qual é adicionado um material ativável (lítio, rádio, ouro, tantaló, etc).

A posição do barco que transporta o detetor é obtida, em intervalos de tempo pre-determinados, por meio de uma rede de teodolitos, por sextantes ou por equipamento de radio-localização.

Apesar dessa aparente simplicidade, cada trabalho deve ser cuidadosamente estudado e planejado, devido às diferenças que apresentam entre si e que introduzem al

terações profundas no método de abordagem.

O método acima descrito é um exemplo típico de um método de integração no espaço, pois se procura, em cada detecção, determinar a distribuição completa do material radioativo no fundo. Uma série de detecções, separadas por intervalos que vão de dias a meses, representa um trabalho completo.

A determinação dos centros de gravidade das sucessivas detecções permite que se determine a velocidade média V_m do transporte sólido, num intervalo de tempo determinado. A vazão mássica é então calculada pela expressão,

$$Q = \rho \ell V_m E \quad (1)$$

onde

- Q = vazão mássica em toneladas/dia
- ρ = massa específica do sedimento, em toneladas/m³
- ℓ = largura de transporte, em metros
- V_m = velocidade média, em m/dia
- E = espessura da camada em movimento, em m.

Este método necessita, portanto, do conhecimento da espessura E da camada em movimento. Esta espessura pode ser determinada por

- amostragens efetuadas no interior da nuvem radioativa
- considerações sobre o modo de transporte (ruas, dunas), obtidos por sondagem ultra-sônica.
- utilização do método do balanço de traçadores.

Cada um dos métodos apresenta vantagens e problemas e são, de um modo geral, complementares. O método do balanço pode ser utilizado diretamente sobre os dados obtidos durante as detecções do material radioativo, a partir de hipóteses-baseadas em resultados experimentais-sobre a distribuição provável do traçador em profundidade.

Antes de abordar o método do balanço, é necessário ressaltar a importância dos dados hidráulicos para a análise e a interpretação dos resultados. Os trabalhos com traçadores, apesar de poderem durar meses, fornecem informações limitadas no tempo. A extrapolação das informações obtidas para períodos mais longos e a interpretação global dos resultados de cada trabalho exigem o conhecimento de dados hidrológicos completos da região em estudo.

A existência desses dados condiciona a validade dos resultados obtidos a partir dos traçadores radioativos.

1.2. O MÉTODO DO BALANÇO DE TAXAS DE CONTAGEM.

1.2.1. PRINCÍPIO.

O método do balanço de taxas de contagem baseia-

se em uma ideia simples. Suponhamos que esteja sendo efetuada a detecção de duas nuvens radioativas, cada uma transportando a mesma atividade A , sendo uma pouco e a outra mais fortemente enterradas. Quanto mais profunda estiver uma camada de traçador, menos contagens ela fornece a uma sonda que passe sobre ela, em consequência da maior absorção sofrida pela radiação e de uma geometria de detecção menos favorável. Segue-se daí que uma dada curva de iso-atividade (por exemplo, 500 c/s) cobrirá uma superfície maior no caso da camada menos profunda (figura 1). Deve, portanto, existir uma relação entre a espessura da camada em movimento E e o número total de contagens que podem ser detectadas N nds. Chamamos balanço das taxas de contagem ao cálculo do valor N desta integral, a partir das curvas de iso-contagem (ou iso-atividade).

$$N = \int \dots \text{ nds}$$

Suponhamos que o detector esteja calibrado, isto é, que se conheça sua resposta f para uma atividade unitária, enterrada à profundidade z

$$f = f(z)$$

Em um local determinado da nuvem radioativa a taxa de contagem n será

$$n = \int_0^e f(z) C(z) dz, \quad (2)$$

onde $C(z)$ é a atividade por unidade de volume, no ponto considerado, à profundidade z . A expressão (2) dá a relação existente entre a espessura da nuvem radioativa no ponto e a taxa de contagem medida.

Pode-se calcular N por

$$N = \iiint_s nds = \iiint_v f(z) C(x, y, z) dx dy dz \quad (3)$$

Chamemos $\Gamma(z)$ a atividade presente, em toda a nuvem, na camada à profundidade z

$$N = \int_0^E f(z) dz \iint C(x, y) dx dy \quad \text{ou}$$

$$N = \int_0^E f(z) \Gamma(z) dz, \quad (4)$$

onde E é a espessura da camada em movimento.

Consideremos agora a forma que pode assumir a resposta da sonda a uma atividade unitária, $f(z)$.

Em geral, $f(z)$ apresenta uma forma exponencial

$$f = f_0 e^{-\alpha z} \quad (5)$$

Esta expressão é determinada por calibração, em laboratório, colocando-se fontes de atividade unitária enterradas a diferentes profundidades z e determinando-se a resposta da sonda para cada uma destas configurações.

Levando a expressão (5) na expressão (4), obtém-se

$$N = \iiint \text{nds} = \int_0^E \Gamma(z) f_0 e^{-\alpha z} dz$$

o que pode ser escrito

$$N = \Gamma_M \int_0^E f_0 e^{-\alpha z} dz = \Gamma_M \frac{f_0}{\alpha} (1 - e^{-\alpha E}) \quad (6)$$

Γ_M , que é uma função de $\Gamma(z)$ e de $f(z)$, é a concentração uniforme equivalente que, repartida na mesma espessura E , daria a mesma taxa de contagem que a repartição real $\Gamma(z)$.

7.

$$\Gamma_M = \frac{\int_0^E \Gamma(z) f(z) dz}{\int_0^E f(z) dz} \quad (7)$$

Este valor de Γ_M \bar{e} , em geral, diferente da concentração \bar{m} dia Γ_m

$$\Gamma_m = \frac{\int_0^E \Gamma(z) dz}{\int_0^E dz} = \frac{A}{E} \quad (8)$$

Façamos

$$\beta = \frac{\Gamma_M}{\Gamma_m} \quad (9)$$

O valor de β pode ser calculado, desde que se façam hipóteses sobre a lei $\Gamma(z)$, pois a resposta da sonda $f(z)$ já foi determinada experimentalmente. Em geral testam-se várias alternativas supondo-se que o traçador se distribui, em profundidade,

- i. de forma linear
- ii. segundo uma lei parabólica, com o máximo na superfície.

iii. segundo uma lei parabólica, com um máximo a um terço da profundidade total.

Introduzindo o valor de β na expressão (6), ob
tem-se

$$\frac{1}{\beta} \frac{\alpha}{f_0} \frac{N}{A} = \frac{1 - e^{-E}}{E} \quad (10)$$

onde

α e f_0 são coeficientes de calibração, determinados em laboratório.

A a atividade injetada, \bar{e} conhecida

N \bar{e} calculado a partir dos dados obtidos no trabalho de campo.

β \bar{e} uma função de E , conhecida a partir das hipóteses feitas sobre a distribuição do traçador em profundidade.

Pode-se, portanto, calcular o valor de E , por métodos gráficos ou matemáticos.

A fórmula (1), que dá a vazão mássica, tem en
tão determinados os seus termos

$$Q = \rho l V_m E$$

l é determinado medindo-se a largura do leito na qual existe movimento; em geral, o cálculo é feito para $l = 1\text{m}$.

V_m é calculado a partir dos centros de gravidade das nuvens. Pode-se, portanto, determinar a vazão mássica de material arrastado pelo fundo.

./mgs.