

LABORATÓRIO DE RADIOISÓTOPOS

RELATÓRIO FINAL SOBRE VIABILIDADE DE NOVAS ÁREAS  
DE DRAGAGEM NA REGIÃO DE SANTOS

VOLUME II

COMPANHIA BRASILEIRA DE TECNOLOGIA NUCLEAR  
INSTITUTO DE PESQUISAS RADIOATIVAS  
C.P. 1941 - Belo Horizonte - MG

AGOSTO DE 1974

LABORATÓRIO DE RADIOISÓTOPOS  
INSTITUTO DE PESQUISAS RADIOATIVAS  
EQUIPE

RESPONSÁVEIS TÉCNICOS

Pedro Edmundo Aun e  
Jefferson Vianna Bandeira

PARTICIPANTES

Miguel Ricardo Aun  
José Olympio N. Monteiro de Castro  
Matheus Eustáquio da Silveira  
Hugo Túlio Rodrigues  
Angelo Alberto Maestrini  
Ricardo da Silva Gomes  
José Carlos Marques  
Fábio Antonio da Silva  
Antonio Fioravante Neto  
Geraldo Godinho  
José Joaquim Lima de Campos  
Duarte Augusto Costa  
Vera Lúcia Mendes

CONSULTOR

Victor Freire Motta  
(INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRAULICAS)

RELATÓRIO FINAL SOBRE VIABILIDADE DE NOVAS  
ÁREAS DE DRAGAGEM NA REGIÃO DE SANTOS.

VOLUME II

Agosto/74

## AGRADECIMENTOS

Tratando-se de um trabalho longo e que envolveu a participação de várias entidades e muitos técnicos, torna-se difícil realizar todos os agradecimentos necessários.

O Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias do DNPVN merece um agradecimento especial pelo apoio dado à equipe do LRI. Nele também é incluída a Cia. Docas de Santos, que facilitou a utilização de suas dragas e batelões todas as vezes em que foram solicitados.

Toda a equipe do LRI que trabalhou em Santos merece a gratidão dos responsáveis. Citamos especialmente o eng. Miguel Ricardo Aun, que se responsabilizou pela coordenação da equipe que analisou as medidas de fundo e os técnicos Fábio Antônio da Silva e José Joaquim Lima de Campos, pela análise dos trabalhos em suspensão.

A equipe do Reator do Instituto de Pesquisas Radioativas recebe também uma citação especial, pelo esforço em preparar e irradiar as amostras utilizadas no trabalho.

## APRESENTAÇÃO

A Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear, através da Diretoria de Tecnologia e Desenvolvimento, celebrou em 06/07/73 um Termo de Convênio, com o Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis, cuja ratificação foi firmada em 05/09/73.

Foram designados órgãos executantes do Convênio, o Instituto de Pesquisas Radioativas, por parte da CBTN, e o Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias, por parte do DNPVN.

O Convênio visou a execução de estudos de transporte de sedimentos de fundo e em suspensão na Baía de Santos utilizando-se traçadores radioativos e medidas hidráulicas convencionais, ficando o IPR, com o encargo dos trabalhos com radioisótopos e o INPH, responsável pelas medidas das correntes oceânicas, direções, frequência e amplitude de ondas na Baía.

O presente relatório é o terceiro da série dos estudos realizados. Mostra os resultados de medidas do coeficiente de difusão nas áreas definidas nos relatórios anteriores.

A finalidade das medidas é a de fornecer informações que auxiliem a interpretação do comportamento do material dragado, após sua descarga no mar, em suspensão.

Os resultados do estudo do material em suspensão, serão objeto de dois outros relatórios adicionais.

LABORATÓRIO DE RADIOISÓTOPOS

MEDIDAS DA MOVIMENTAÇÃO DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO,  
NA ÁREA DE SANTOS, COM TRAÇADORES RADIOATIVOS.

COMPANHIA BRASILEIRA DE TECNOLOGIA NUCLEAR

INSTITUTO DE PESQUISAS RADIOATIVAS

C.P. 1941 - Belo Horizonte - MG

1973/1974

LABORATÓRIO DE RADIOISÓTOPOS  
INSTITUTO DE PESQUISAS RADIOATIVAS  
EQUIPE

RESPONSÁVEIS TÉCNICOS

Pedro Edmundo Aun            e  
Jefferson Vianna Bandeira

PARTICIPANTES

Miguel Ricardo Aun  
José Olympio N. Monteiro de Castro  
Matheus Eustáquio da Silveira  
Hugo Túlio Rodrigues  
Angelo Alberto Maestrini  
Ricardo da Silva Gomes  
José Carlos Marques  
Fábio Antônio da Silva  
Antônio Fioravante Neto  
Geraldo Godinho  
José Joaquim Lima de Campos  
Duarte Augusto Costa  
Vera Lúcia Mendes

CONSULTOR

Victor Freire Motta  
(INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRAULICAS)

## R E S U M O

Nesta parte do relatório sobre o estudo realizado pelo Laboratório de Radioisótopos do Instituto de Pesquisas Radioativas para o Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis, na região de Santos, são apresentados os resultados das medidas relativas a sedimento em suspensão.

Os batelões carregados pela draga são marcados diretamente com ouro radioativo. Após sua descarga, o movimento do material em suspensão é acompanhado por dois barcos, transportando detectores de cintilação a profundidades diversas. No dia seguinte à detecção em suspensão, é realizada uma detecção de fundo, por meio de uma sonda arrastada por um trenô.

São apresentados os resultados de duas injeções na região da Ponta de Itaipú (21 de Novembro e 1º de Outubro de 1973) e de uma injeção na área da Munduba (28 de Janeiro de 1974).

Nas duas primeiras, o movimento do material em suspensão fez-se na direção EW e na última, para o nordeste. A região máxima de espalhamento do material injetado, no fundo, tinha 3.500m por 3.000m.

Conclui-se que a maior parte do material descarregado deposita-se logo após a injeção, na região abaixo da trajetória seguida pelo batelão. Uma parte da fração fina move-se em suspensão e, nas proximidades do fundo, segue as leis de dispersão determinadas na 3ª parte deste relatório. Determinou-se também que a natureza do

material dragado tem o papel mais importante na velocida  
de de decantação, sendo também essencial a influencia do  
tipo de dragagem executado.

## Í N D I C E

### TÍTULO.

1.	INTRODUÇÃO.	pag.	1
2.	A TÉCNICA EXPERIMENTAL.		
	2.1. Considerações Preliminares.	pag.	2
	2.2. A Marcação da Vasa.	pag.	2
	2.3. A Injeção.	pag.	4
	2.4. A Detecção.	pag.	5
	2.5. A Análise dos dados.	pag.	6
3.	O TRABALHO DE CAMPO.		
	3.1. A Campanha de 21, 22 e 23 de Novembro de 1973, na Área da Ponta de Itaipū.	pag.	10
	3.2. A Campanha de 28 e 29 de <u>Ja</u> neiro de 1974, na Área da <u>Pon</u> ta da Munduba.	pag.	28
	3.3. A Campanha de 19, 2 e 3 de Outubro de 1973, na Área da Ponta de Itaipū.	pag.	38

4. CONCLUSÕES PRELIMINARES. pag. 48

5. CONCLUSÕES GERAIS DAS EXPERIÊNCIAS  
RADIOATIVAS NOS POSSÍVEIS FUTUROS  
LOCAIS DE DESPEJO AO LARGO DE SAN  
TOS. pag. 50

APÊNDICE 1.

APÊNDICE 2.

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 - Curvas de isocontagem, medida de sedimento em suspensão, Itaipú. Sonda 7, profundida de 11 metros - dia 21/11/73.
- FIGURA 2 - Curvas de isocontagem, medida de sedimento em suspensão, Itaipú. Sonda 8, profundida de 10 metros - dia 21/11/73.
- FIGURA 3 - Curvas de isocontagem, medida de sedimento em suspensão, Itaipú. Sonda 10, profundidade 16 metros - dia 21/11/73.
- FIGURA 4 - Curvas de isocontagem, detecção de fundo do sedimento injetado em suspensão, Itaipú. Dias 22 e 23/11/73.
- FIGURA 5 - Diagrama de transporte, detecção de fundo Itaipú - dias 22 e 23/11/73.
- FIGURA 6 - Gráfico contagem máxima versus tempo, Itaipú, suspensão - dia 21/11/73.
- FIGURA 7 - Gráfico contagem máxima versus tempo, Itaipú - dia 21/11/73.
- FIGURA 8 - Gráfico dispersão versus tempo, Itaipú, suspensão - dia 21/11/73.

- FIGURA 9 - Gráfico dispersão versus tempo, Itaipú, sus  
pensão - dia 21/11/73.
- FIGURA 10 - Curvas de isocontagem, medida de sedimento  
em suspensão, Munduba. Sonda 4, profundi  
dade 20 metros - dia 28/01/74.
- FIGURA 11 - Curvas de isocontagem, medida de sedimento  
em suspensão, Munduba. Sonda 8, profundi  
dade 12 metros - dia 28/01/74.
- FIGURA 12 - Curvas de isocontagem, detecção de fundo  
do sedimento injetado em suspensão, Mundu  
ba - dia 28/01/74.
- FIGURA 13 - Diagrama de transporte, detecção de fundo  
Munduba - dia 28/01/74.
- FIGURA 14 - Gráfico da taxa de contagem de cada curva  
de isodose versus a área contida por ela.  
Profundidade 11 metros, Itaipú - dia 01/10
- FIGURA 15 - Gráfico de taxa de contagem máxima versus  
tempo. Sonda 8, profundidade 3 metros.  
Itaipú - dia 01/10/73.
- FIGURA 16 - Gráfico de taxa de contagem máxima versus  
tempo. Sonda 4, profundidade 7 metros.  
Itaipú - dia 01/10/73.

- FIGURA 17 - Gráfico de taxa de contagem máxima versus tempo. Sonda 10, profundidade 11 metros. Itaipú - dia 01/10/73.
- FIGURA 18 Curvas de isocontagem, sonda 8, profundida de 3 metros. Itaipú - dia 01/10/73.
- FIGURA 19 - Curvas de isocontagem, sonda 4, profundida de 7 metros. Itaipú - dia 01/10/73.
- FIGURA 20 - Curvas de isocontagem, sonda 10, profundi dade 11 metros. Itaipú - dia 01/10/73.

MEDIDAS DA MOVIMENTAÇÃO DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO,  
NA ÁREA DE SANTOS, COM TRAÇADORES RADIOATIVOS.

1. INTRODUÇÃO

O Laboratório de Radioisótopos (L.Ri) do Instituto de Pesquisas Radioativas realizou uma série de medidas na região de Santos, em colaboração com o Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH) do Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis.

Este trabalho estudou duas novas áreas de despejo para o material dragado da região do Porto, situadas ao largo das Pontas do Itaipū e da Munduba. Este relatório, que completa a série referente a este estudo, apresenta os resultados de medidas de movimentação de sedimento em suspensão, entre sua descarga dos batelões de transporte e sua deposição no fundo. A sua finalidade é determinar o espalhamento inicial da vasa após a descarga, complementando as informações já obtidas, referentes ao movimento no fundo.

Além de um teste realizado no Lago de Maracaibo, na Venezuela e orientado por especialistas franceses - e que apresentou escassos resultados - esta foi a primeira vez que um trabalho deste tipo foi realizado na América do Sul.

## 2. A TÉCNICA EXPERIMENTAL.

### 2.1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.

O trabalho consiste em marcar a vasa contida em um batelão, carregado por uma draga, com um traçador radioativo. Após a descarga do batelão, a movimentação do material é acompanhada por dois barcos, transportando contadores de cintilação a profundidades diversas. Um dos barcos procura manter-se constantemente dentro da nuvem radioativa, orientando o segundo barco que realiza as medidas de concentração do traçador. Como a decantação do material é rápida, as medidas devem ser realizadas em curto espaço de tempo e com precisão; isto torna a técnica experimental e a coordenação bastante complexas.

Os batelões utilizados transportavam 500 m<sup>3</sup> de vasa em meio aquoso e sua descarga era feita abrindo-se comportas situadas no seu fundo. A draga que os carregava era a "Vera Cruz", do tipo de alcatruzes. O material injetado variou bastante, em função da região dragada; procurou-se utilizar sempre material de assoreamento recente, menos compacto, e com maior probabilidade de se movimentar após a descarga.

### 2.2. A MARCAÇÃO DA VASA.

O traçador utilizado foi o ouro-198, emissor gama com a energia de 411 kev e meia-vida de 2,7 dias. As

atividades injetadas variaram entre 1 e 3 curies. Para a marcação da vasa, foi montado um equipamento especial na parte mais alta da draga. As etapas da marcação foram:

i. Dissolução do radioisótopo.

O ouro, em lâminas finas, era retirado da blindagem de transporte e colocado na blindagem de dissolução. Existe nela um recipiente de vidro para o ataque químico, aquecido para diminuir o tempo de dissolução. O material era atacado com água régia e, após a dissolução, o pH era ajustado para sete. Em seguida, a solução era transferida para outro recipiente também blindado e acoplado a uma bomba peristáltica.

ii. Preparação da vasa.

Alguns quilos de vasa previamente peneirada eram colocados em um recipiente provido de um misturador. Adicionava-se água e procedia-se à homogeneização da suspensão. Este recipiente é também acoplado a uma bomba peristáltica.

iii. Marcação da vasa.

Ligando-se simultaneamente as duas bombas peristálticas, a vasa e o traçador e

ram postos em contato. A vasa marcada era impulsionada pelas bombas através de um longo tubo plástico, que se abria, por um difusor, sobre a canaleta na qual as caçambas da draga descarregavam a vasa do fundo. O misturamento do material era assegurado pela queda da vasa no batelão. A marcação era iniciada logo após se conseguir o vedamento das comportas do batelão e prosseguia por cerca de uma hora, até se completar a carga.

### 2.3. A INJEÇÃO.

O batelão marcado era dirigido para o local de despejo pela rede de triangulação (teodolitos). Os barcos de detecção acompanhavam-no de perto. A injeção constava da abertura das comportas do batelão e durava em regra geral, entre 3 e 5 minutos. A partir desse instante, os teodolitos passavam a acompanhar os barcos de detecção, enquanto o batelão retornava ao porto. Um dos técnicos do Laboratório de Radioisótopos era mantido no batelão para proceder à descontaminação, feita por jato d'água. A atividade remanescente foi sempre inferior às permitidas nas Normas Internacionais.

#### 2.4. A DETECÇÃO.

O barco que se mantinha permanentemente sobre a nuvem transportava três sondas de cintilação, suspensas a diferentes profundidades. Ela orientava o segundo barco, com quatro sondas, sobre os locais de medida. Estas eram realizadas enquanto havia atividade detectável, o que ocupava entre duas e três horas. O posicionamento era realizado por teodolitos, que visavam alternativamente cada um dos barcos. A comunicação barcos-teodolitos era assegurada por rádio-transmissores portáteis.

As detecções foram executadas com detectores de cintilação portáteis SRAT, tipo SPP3, acoplados a registradores Hewlett Packard 7100 BM. Estes eram alimentados por geradores a gasolina Honda.

As sondas eram suspensas em presilhas instaladas em um cabo de aço. A sonda mais profunda era colocada em uma gaiola metálica lastrada, para manter o cabo, tanto quanto possível, na vertical e para protegê-la contra choques.

Corantes (Rhodamina e Fluoresceína) eram utilizados para marcar a posição da nuvem radioativa e facilitar o deslocamento dos barcos para os pontos de medida.

Na prática, as sondas menos profundas cessavam de detectar atividade logo após a injeção; a detecção prosseguia com as sondas mais profundas.

No dia seguinte ao trabalho em suspensão, era feita uma detecção do material radioativo depositado no

fundo, conforme a técnica descrita na primeira e na segunda partes deste relatório. Era calculado o balanço do material presente no fundo, com a finalidade de estimar as perdas causadas pela movimentação da vasa, em suspensão, para fora da área em estudo.

#### 2.5. A ANÁLISE DOS DADOS.

A análise é iniciada pela transformação das coordenadas bipolares, obtidas no campo, em coordenadas cartesianas. Em seguida, é desenhada a trajetória completa seguida pelos dois barcos.

Os dados analógicos, obtidos nos registradores, são tratados a seguir. Inicialmente é subtraído o ruído de fundo, lendo-se a altura de cada pico presente no gráfico e transformando-se o valor obtido em taxa de contagem. São assim tratados todos os trechos que apresentam atividade, para cada uma das sondas. Em seguida, estabelece-se uma escala de tempos, tendo como instante inicial a injeção de traçador. Selecionam-se a seguir os trechos que, em conjunto, representem uma configuração da nuvem radioativa; o seu conjunto é utilizado na elaboração de curvas de isocontagem.

Os dados obtidos destas curvas são tratados da maneira exposta no parágrafo 2.3 da terceira parte deste relatório, pelo método do tratamento-padrão.

Em resumo, são traçados três gráficos:

- i. Um gráfico do logarítmo natural da taxa de contagem de cada curva de isocontagem contra a área envolvida pela curva. Sua finalidade é verificar se as distribuições de densidade de probabilidade do traçador são gaussianas. Além disso, o coeficiente angular  $m$  da melhor reta que passa pelos pontos experimentais permite o cálculo da dispersão  $\sigma^2$  da nuvem.

$$\sigma^2 = - \frac{1}{2\pi m} \quad (2.5.1)$$

- ii. O segundo gráfico representa a contagem máxima obtida em cada nuvem contra o tempo, numa escala duplamente logarítmica. Este gráfico é utilizado na determinação da dimensão do fenomeno de dispersão.
- iii. O terceiro gráfico apresenta o logarítmo natural da dispersão versus o logarítmo natural do tempo. No caso de um modelo do tipo Fick, a melhor reta que passa pelos pontos experimentais deve ter um coeficiente angular igual a 1. Para o modelo de Okubo-Pritchard, este coeficiente angular deve ser igual a 2; para o modelo de Obukhov, o seu valor deve ser 3.

Detalhes destes modelos são apresentados no Anexo 1 da terceira parte deste relatório. Não se espera que o fenômeno estudado siga um desses modelos, pois, além da dispersão turbulenta, aparece o fenômeno da decantação do material. Uma primeira aproximação seria combinar um modelo de difusão com a lei de Stokes:

$$V = g \frac{(\rho - \rho_F)d^2}{18\eta} \quad (2.5.2)$$

onde

$V$  é a velocidade de queda da partícula, de diâmetro  $d$ , em cm/s.

$g$  é a aceleração da gravidade.

$\rho$  e  $\rho_F$  são as densidades do sólido e do fluido, em g/cm<sup>3</sup>.

$\eta$  é a viscosidades do fluido, em poises.

Este estudo é apresentado no Apêndice 1 de modo detalhado.

Verifica-se que as partículas com diâmetro entre 5 e 20 microns praticamente não sofreriam decantação no período de 3 horas, ordem do intervalo de tempo coberto.

to por cada experiência. Nesta fração, está concentrada a maior parte da atividade injetada, pois a marcação com ouro é proporcional à superfície total do material e não a seu volume. Se isto acontecesse na prática, a decantação observada durante as medidas seria muito pequena e o problema poderia ser tratado como um caso de difusão turbulenta, tal como o apresentado na terceira parte deste relatório.

Um dos motivos para a decantação rápida é o próprio método de dragagem empregado, que aglomera o material em grandes blocos. Parte deles é desfeita durante a descarga da vasa no batelão de transporte, mas uma fração ponderável - e não determinável - permanece sob a forma compacta. Outro fenomeno que interviria na decantação do material é a formação de flocos, causada pela descarga da vasa em ambiente salino. Dados do Laboratório Central de Hidráulica da França afirmam que, em meio floculante, as velocidades médias de queda estão entre 0,15 e 0,60 mm/s, qualquer que seja o diâmetro das partículas elementares, até um limite de 30 microns. O material deveria atingir o fundo após um mínimo de 7 horas depois da injeção. Isso demonstra que, mesmo que a floculação aumente a velocidade de decantação, não é ela o fenomeno mais importante para explicar os rápidos tempos de queda observados.

A impossibilidade de aplicar modelos matemáticos simples ao fenomeno estudado obriga a trata-lo de um modo inteiramente experimental.

## 3. O TRABALHO DE CAMPO.

3.1. A CAMPANHA DE 21, 22 E 23 DE NOVEMBRO DE 1973,  
NA ÁREA DA PONTA DE ITAIPÚ.

A injeção de sedimento em suspensão foi realizada no dia 21 de Novembro, às 14,30 horas, sendo marcado o batelão "Caiubura", com carga completa (500 m<sup>3</sup>). O material marcado era proveniente de assoreamento recente, originário da região do Saboão. O mar apresentava-se calmo, com ondas SE, de amplitude entre 0,5 e 1 metro, com um período de 11 segundos. O vento era SE, fraco. Antes da injeção foram realizadas medidas de corrente, que aparecem na tabela 1.

TABELA 1

MEDIDAS DE CORRENTE		
Distancia ao fundo (m)	Velocidade (cm/s)	Direção (graus)
4	18	270
6	16	225
8	26	270
10	31	---
12	18	---

Foram utilizados dois barcos na detecção; o "Gaúcho V", que devia acompanhar a nuvem, transportava três sondas:

Sonda	Profundidade (m)
1	3
7	11
10	16

O barco que devia realizar as medidas utilizou quatro sondas:

Sonda	Profundidade (m)
2	2
4	6
8	10
9	14

O batelão foi marcado com duas gramas de ouro radioativo, com uma atividade de 1,25 Ci.

Nos dias seguintes, foram realizadas detecções de fundo, cobrindo o espalhamento do material, analisadas conforme o método exposto nas duas primeiras partes deste relatório.

A análise dos resultados em suspensão seguiu a metodologia proposta na terceira parte deste relatório. As figuras 1, 2 e 3 apresentam as curvas de isocontagem referentes às sondas 7 (11m), 8 (10m) e 10 (16m). O traço das nuvens apresenta uma imprecisão maior do que a obtida em medidas de fundo, pois são desenhadas a partir de dados menos numerosos. Uma análise das diversas curvas obtidas é feita a seguir.

SONDA 7: O comprimento da nuvem é da ordem de 1000 m, para uma largura de 400 m. O sentido geral do movimento é leste. A contagem máxima encontrada na primeira nuvem é de 100 c/s, passando a 50 c/s na segunda nuvem. A profundidade da sonda 7 é 11 metros.

SONDA 8: A sua profundidade é 10 metros. O material espalhou-se por uma região com 900 m de comprimento e 200 m de largura. As contagens máximas obtidas para cada nuvem são 600 c/s, 100 c/s e 20 c/s.

SONDA 10: A região de espalhamento tem 1000 metros de comprimento e 400 m de largura. Nesta detecção observa-se que a terceira nuvem apresenta atividade em uma

região bastante grande, que parte das proximidades do ponto de injeção. Isso indica material fino, de decantação lenta. As contagens máximas das três nuvens são 70 c/s, 60 c/s e 20 c/s. A profundidade estudada é de 16 m. A nuvem obtida cobre bastante bem a área em que foi detectada alta atividade, nas medidas de fundo realizadas nos dias seguintes.

SONDA 4: A profundidade é de 6 metros. O comprimento da nuvem é de 900 m, mas a atividade encontrada a esta distancia é muito pequena (15 c/s). A região de atividade apreciável tem 250 m de comprimento. A atividade detectada decresce rapidamente nesta distancia, caindo de 1500 c/s a 25 c/s.

SONDA 1 e 2: Estas sondas, situadas às profundidades de 3 m e 2 m, respectivamente, detectaram pouco material radioativo. A sonda 1 apresentou uma nuvem com 100 c/s.

SONDA 9: Foram detectadas três nuvens, próximas à região de injeção, com máximos de 1500 c/s, 150 c/s e 150 c/s. É provável que a atividade pudesse ser detectada ainda por uma distancia apreciável, o que não aconteceu. A sonda 9 está à profundidade de 14 m.

Nos dias 22 e 23 de Novembro foi realizada uma detecção do material radioativo depositado no fundo, por meio da técnica habitual da sonda arrastada por um trenô.

A figura 4 apresenta as curvas de isocontagem obtidas nesta detecção. Foram encontradas atividades muito altas na região próxima à injeção, espalhadas em uma faixa estreita, que corresponde ao trajeto do batelão durante a sua descarga. A forma geral da nuvem concorda com as formas das curvas obtidas durante o trabalho em suspensão, inclusive na direção geral do movimento. A detecção de fundo foi analisada pela aplicação do método do balanço (Parte 1, Apêndice 1 deste relatório). Toda a atividade injetada foi recuperada o que demonstra que a perda de material foi quase nula neste trabalho. A figura 5 apresenta o diagrama de transporte referente à detecção de fundo. A atividade espalhou-se em uma área aproximadamente retangular, com 1400 m de comprimento e 500 m de largura. Duas outras manchas de atividade baixa, foram detectadas a uma distância de cerca de 4 km do ponto de injeção. É, entretanto, impossível determinar com certeza se estas manchas são originárias do material marcado pelo batelão ou se pertencem a uma região de ruído de fundo aumentado pelas experiências realizadas anteriormente na área. A última hipótese parece mais provável.

A análise das medidas em suspensão foi realizada pela aplicação do tratamento padrão. Os resultados obtidos estão resumidos na tabela 2 e nas figuras 6, 7, 8 e 9.

As figuras 6 e 7 apresentam, em escala duplamente logarítmica, os gráficos da contagem máxima de cada nuvem contra o intervalo de tempo decorrido entre a injeção e o máximo. As figuras 8 e 9 mostram, em escala duplamente logarítmica, os gráficos da dispersão  $\sigma^2$  versus o tempo.

Como era de se esperar, pois não se trata de um fenômeno simples de difusão turbulenta, algumas nuvens deram origem a resultados inteiramente fora dos valores definidos nos modelos matemáticos. Apenas três sondas mostram resultados que indicam a aplicação de um modelo do tipo Fick, bidimensional: as sondas 7, 8 e 10, às profundidades de 11 m, 10 m e 17 m.

## RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO TRATAMENTO PADRÃO

TABELA 2

SONDA	NUVEM	t (min)	CONTAGEM MAX. (C/min)	M'	lnP'	$\sigma^2$ (m <sup>2</sup> )	m''	lnP''	
1 (3m)	1	1,15	5580	-0,340	8,674	8.315	-0,231	9,058	
	2	2,70	1908						4004
7 (11m)	1	6,0	6260	-0,683	10,019	8390	1,104	7,057	
		29,0	2700						
10 (17m)	1	7,4	4464	-0,698	10,005	4590	0,337	6,467	
	2	26,4	3528						5280
	3	----	----						----
	4	76,5	840						34330
4 (6m)	1	1,3	90000	-1,158	11,711	384	0,503	5,819	
	2	7,1	12600						902
9 (14m)	1	0,6	90000	-0,704	11,041	701	0,323	6,409	
	2	16,8	8280						760
	3	39,5	4800						3455
8 (10m)	1	1,93	39960	-0,980	11,387	184	1,006	4,451	
	2	7,25	14640						715
	3	22,45	4980						1103
	4	71,5	1140						8793

Provavelmente, a estas profundidades, o movimento é devido a uma parte da fração fina do material injetado. Esta fração comporta-se de um modo semelhante a um fluido, por apresentar decantação extremamente lenta.

Como ilustração, calcularemos os valores dos coeficientes de difusão para a nuvem 4, correspondente à profundidade de 10 m. Tem-se:

$$D_x = - \frac{1}{4\pi mt} \cdot \frac{a_1}{a_2}$$

$$D_y = - \frac{1}{4\pi mt} \cdot \frac{a_2}{a_1}$$

onde

$a_1$  e  $a_2$  são os semi-eixos da elipse assimilada à curva de isodose considerada;

$t$  é o tempo decorrido entre a injeção e a detecção considerada;

$m$  é o coeficiente angular da reta obtida no diagrama semi-logarítmico da contagem de uma determinada curva versus a área envolvida por ela.

Para a nuvem citada:  $a_1 = 332$  m ;  
 $a_2 = 81$  m ;  
 $t = 71,5$  min ;  
 $m = -1,81 \times 10^{-5}$

A aplicação das expressões citadas dá como re  
sultado

$$D_x = 4,2 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$D_y = 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$$

Estes valores são superiores aos encontrados na medida de coeficientes de difusão realizada na área da Ponta de Itaipu. Isso quer dizer que, no caso presente, o material sofre maior dispersão. Em um determinado ponto, após decorrido um intervalo de tempo  $t$ , a concentração de material será menor no caso agora apresentado do que nas medidas realizadas com bromo. Os coeficientes de difusão tem, entretanto, a mesma ordem de grandeza e representam fenomenos semelhantes.

Dos dados até agora apresentados conclui-se que:

- i. O material descarregado do batelão espalhou-se em uma área retangular de 1500 m de comprimento e 500 m de largura. A de posição fez-se rapidamente, em cerca de 1,5 horas após a injeção.
- ii. Pouco material foi perdido por movimento em suspensão, já que a detecção de fundo recuperou praticamente todo o material injetado.

- iii. O sentido geral do movimento foi para o leste.
- iv. As detecções em suspensão indicaram com clareza a área de deposição. O material se deposita rapidamente, como indicam as sondas 1 e 4. A maior parte do material deposita-se nas proximidades do local de descarga.
- v. Em profundidades maiores, uma parte da fração fina do material movimenta-se praticamente como um fluido, podendo-se, inclusive, aplicar modelos de dispersão a seu estudo. Os coeficientes de difusão são da mesma ordem de grandeza que os obtidos na terceira parte deste relatório, para a área de Itaipú. A fração que se movimenta não parece conter uma parcela importante do material injetado.
- vi. Aparentemente, a forma de dragagem é o fator mais importante para esta rápida deposição, devido à aglomeração do material em blocos compactos. A parte mais importante em depósito segue a trajetória do batelão durante a descarga.

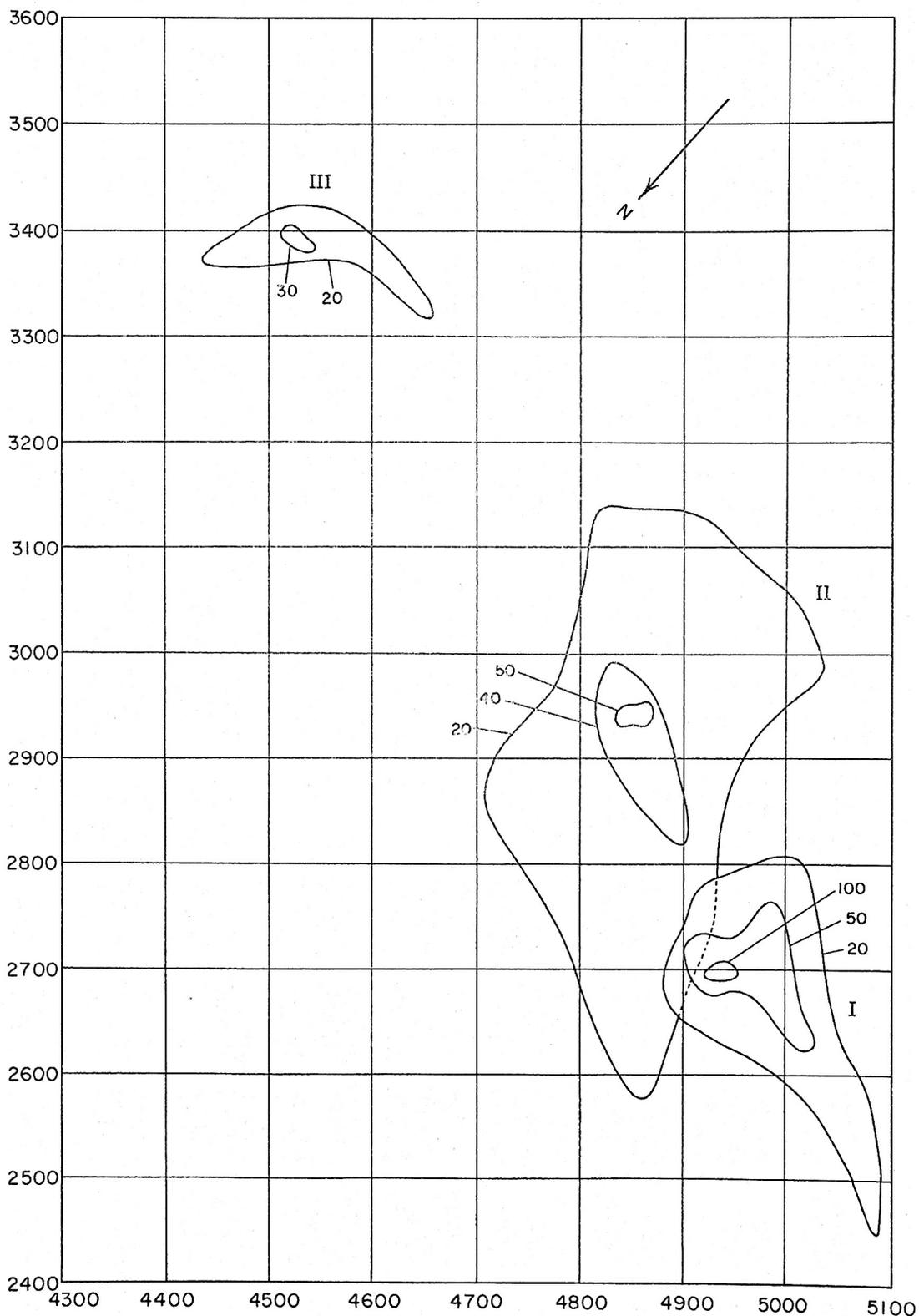


FIG.1 - ITAIPU - SUSPENSÃO - 21/II/73 - SONDA 7, PROF. 11 m

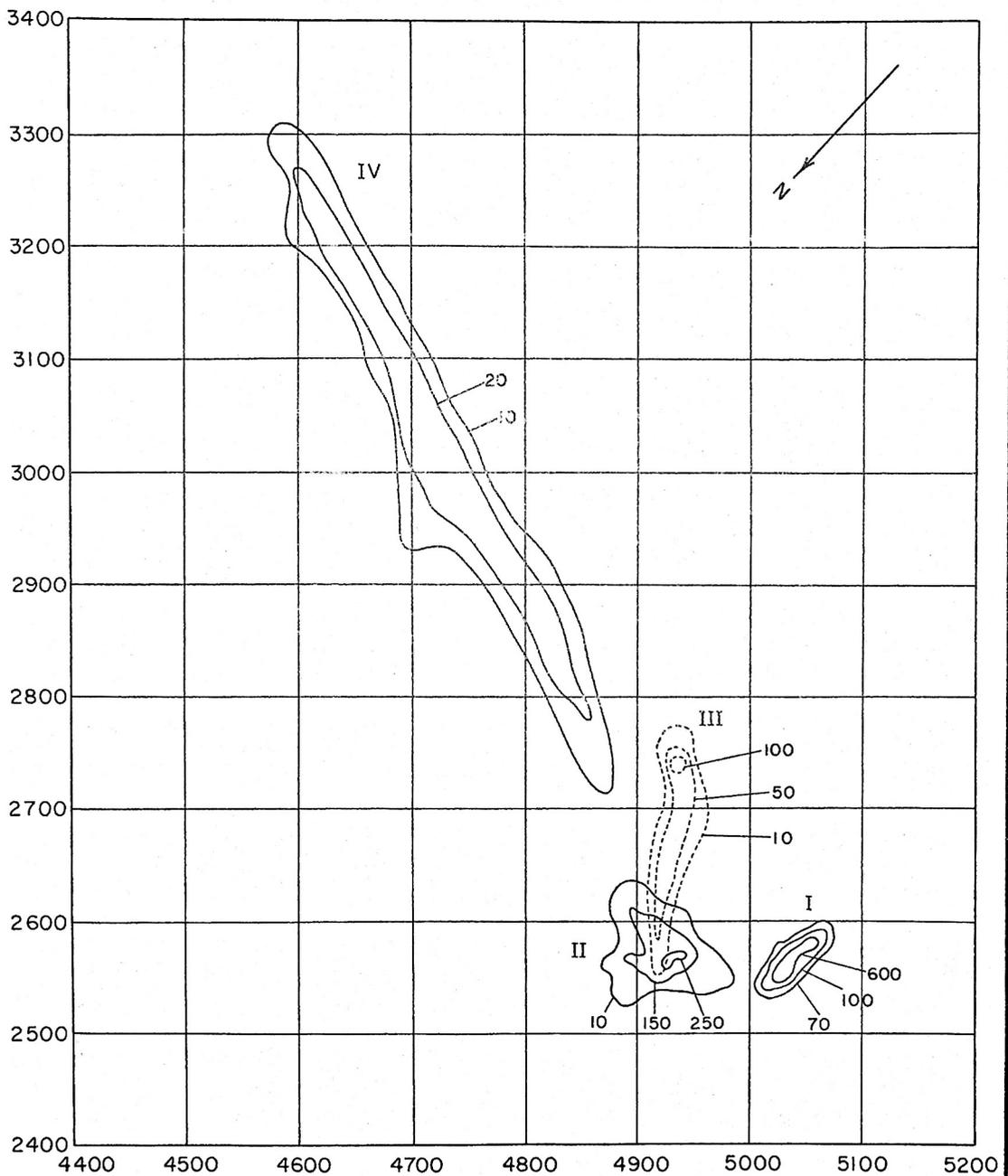


FIG. 2 - ITAIPU - SUSPENSÃO - 21/II/73 - SONDA 8, PROF. 10 m

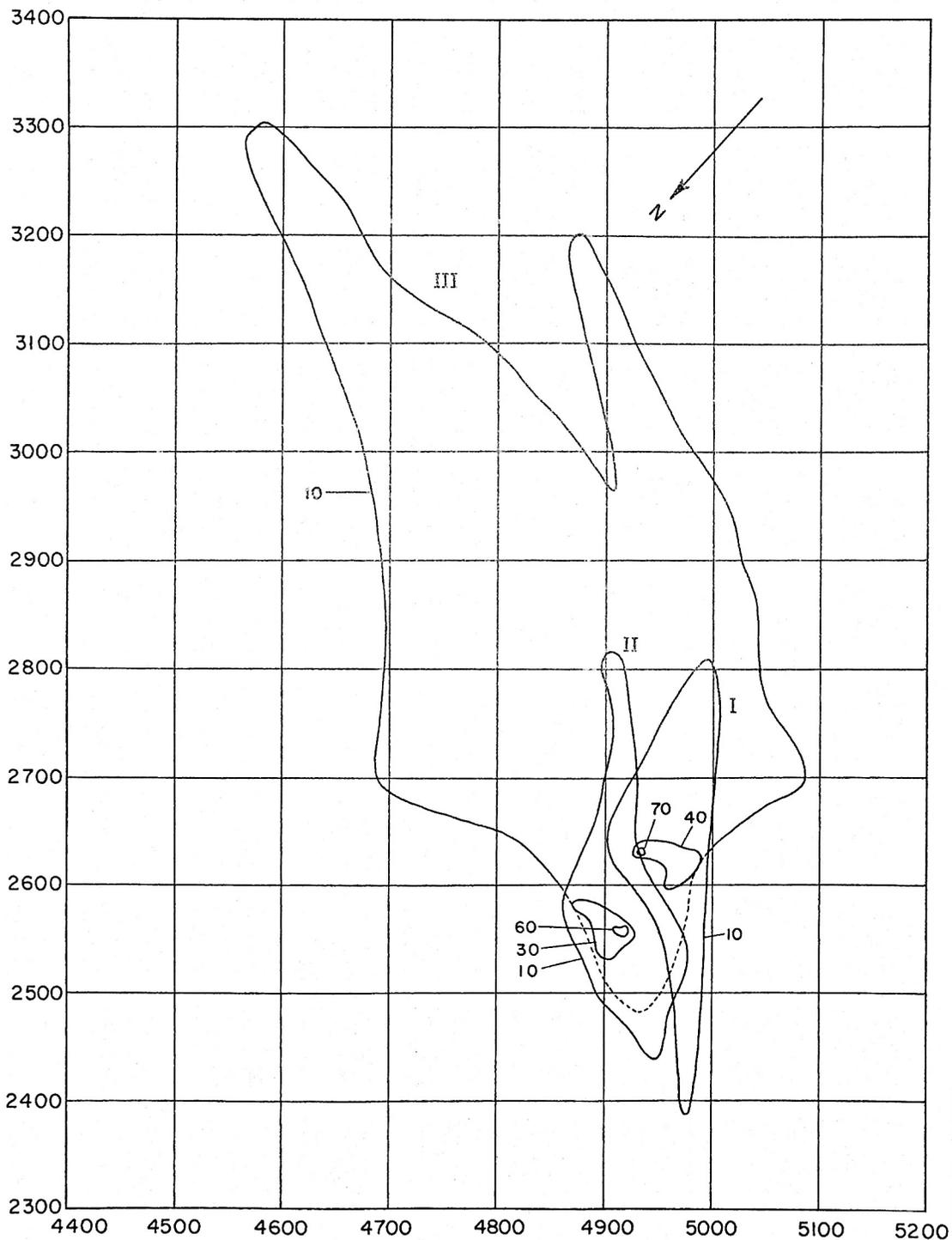
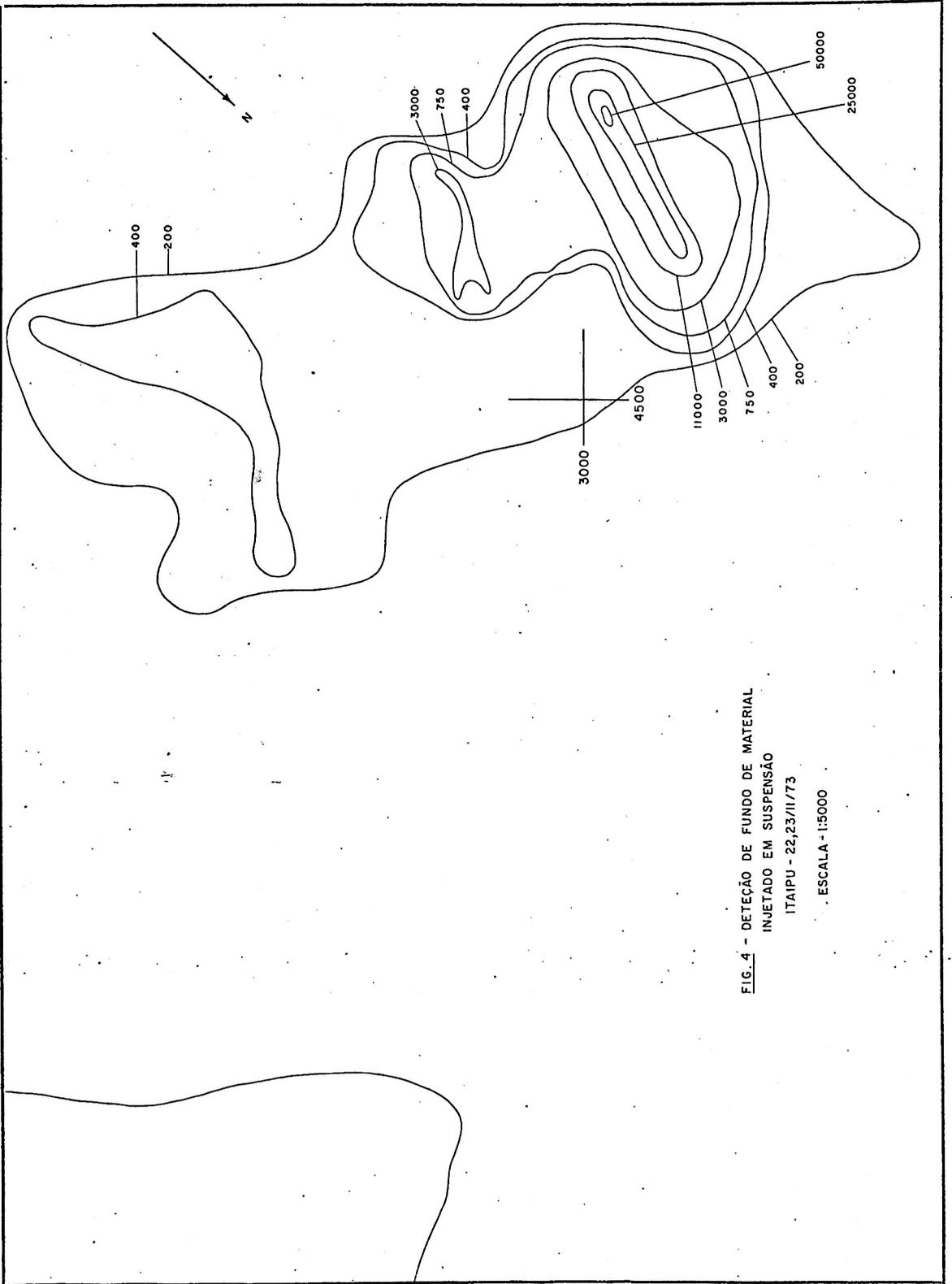


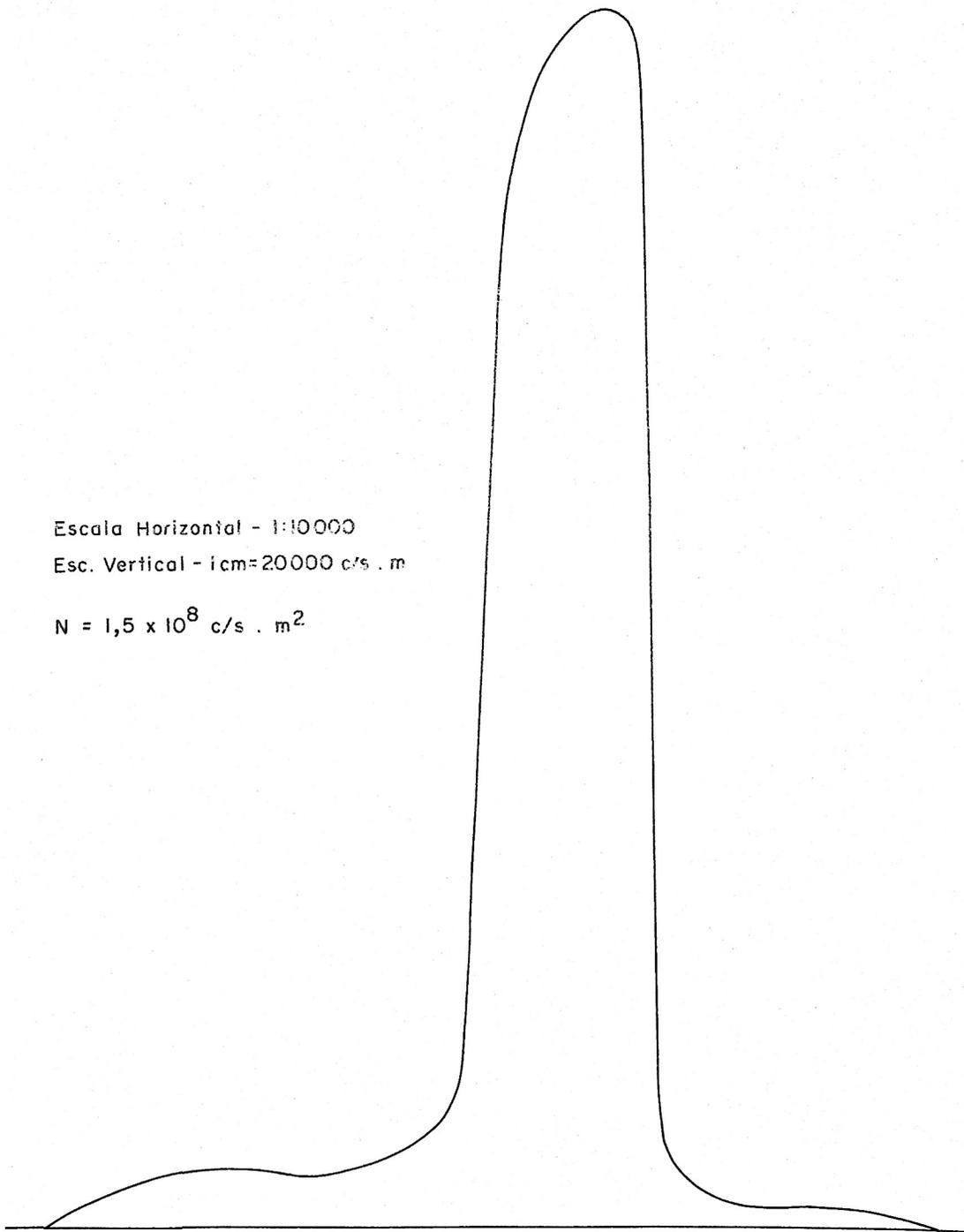
FIG. 3 - ITAIPU - SUSPENSÃO - 21/11/73 - SONDA 10, PROF. 16 m



**FIG. 4 - DETEÇÃO DE FUNDO DE MATERIAL  
INJETADO EM SUSPENSÃO  
ITAIPU - 22,23/11/73  
ESCALA - 1:5000**

Escala Horizontal - 1:10000  
Esc. Vertical - 1cm=20000 c/s . m

$$N = 1,5 \times 10^8 \text{ c/s} \cdot \text{m}^2$$



**FIG 5 - DIAGRAMA DE TRANSPORTE, DETEÇÃO DE FUNDO DE MATERIAL INJETADO EM SUSPENSÃO ITAIPU-22,23/11/73**

FIG. 6  
GRÁFICO CONTAGEM MÁXIMA VERSUS TEMPO  
SUSPENSÃO - ITAIPU - 21/11/73

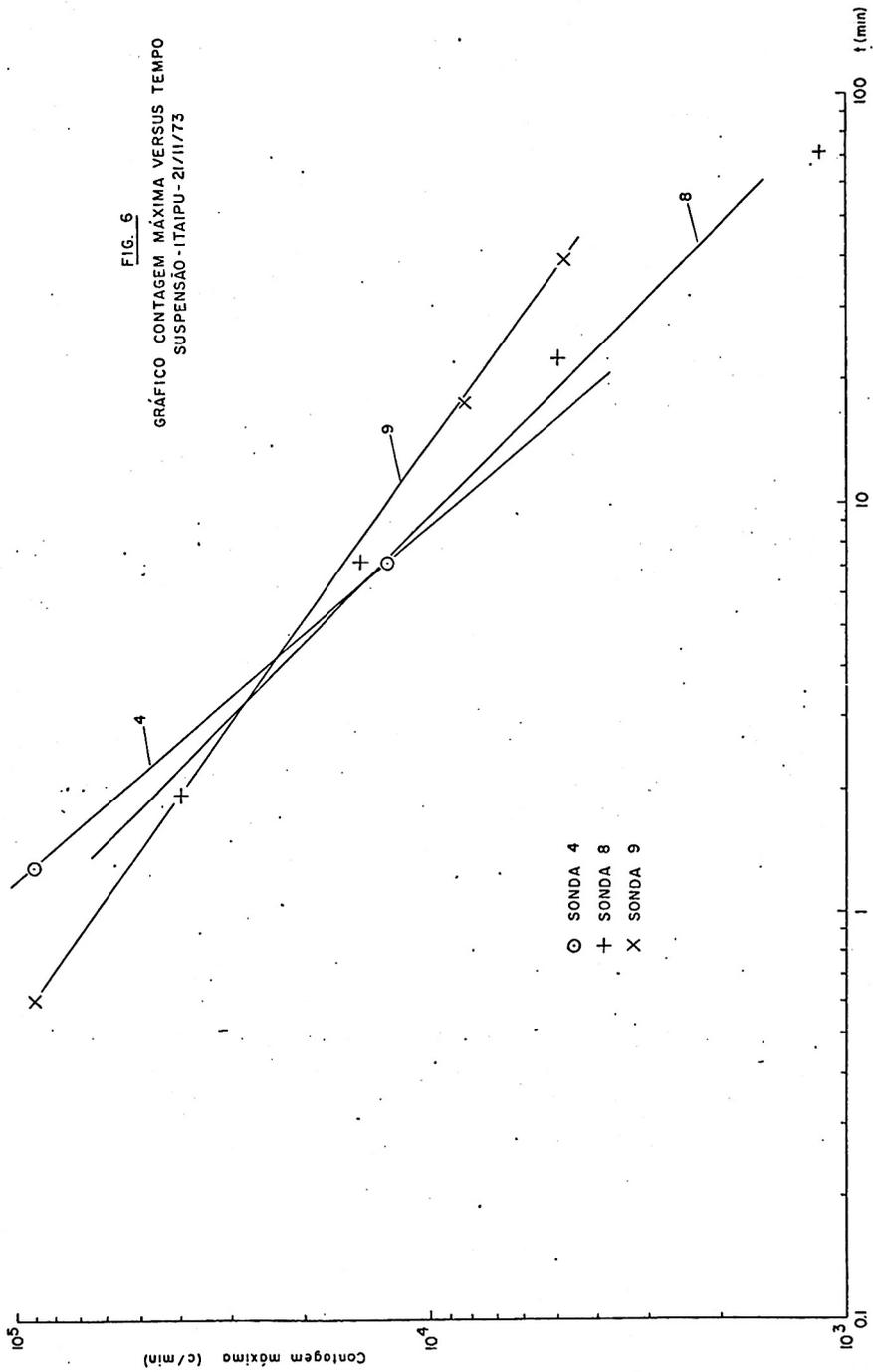
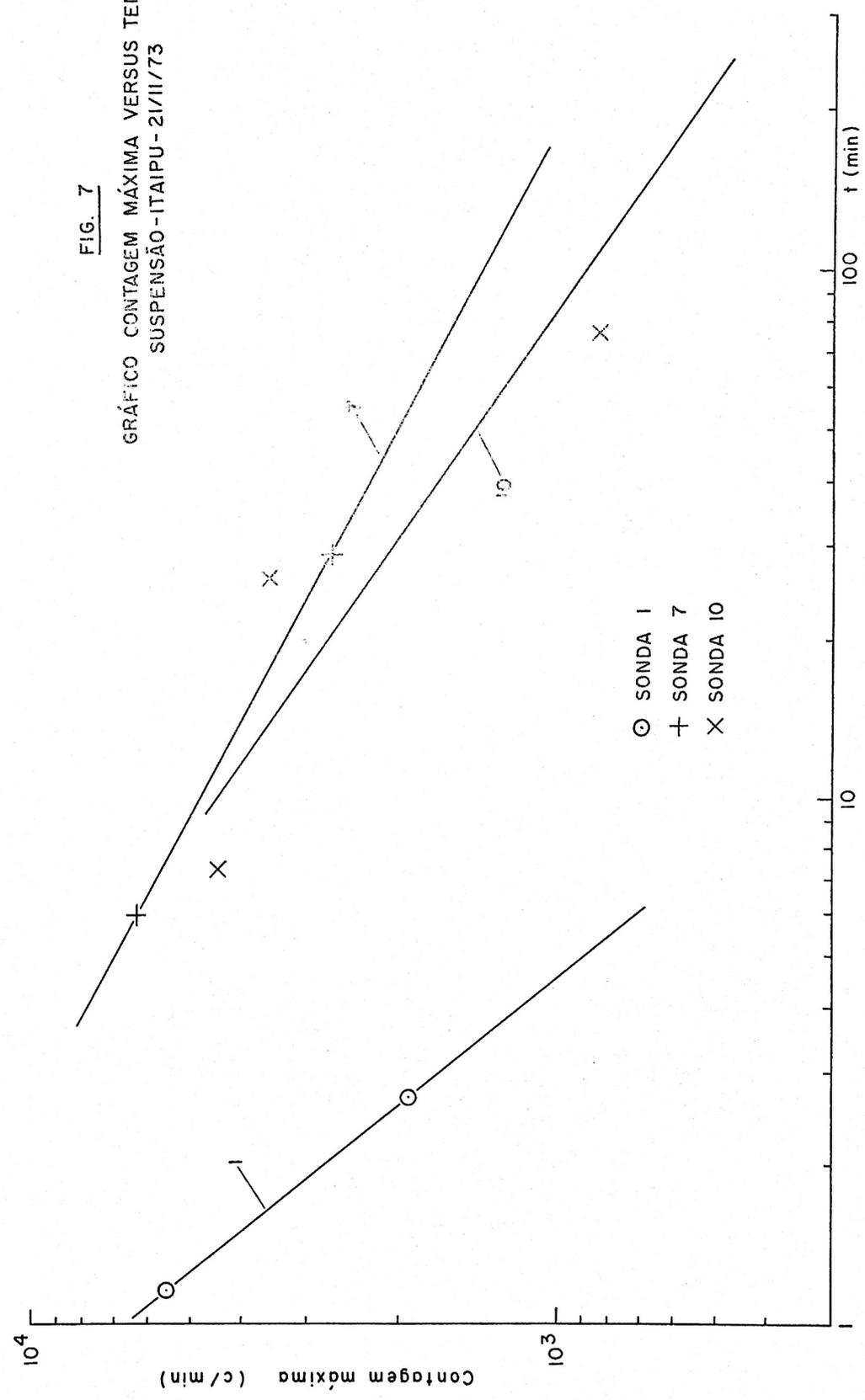


FIG. 7

GRÁFICO CONTAGEM MÁXIMA VERSUS TEMPO  
SUSPENSÃO-ITAIPU- 21/11/73



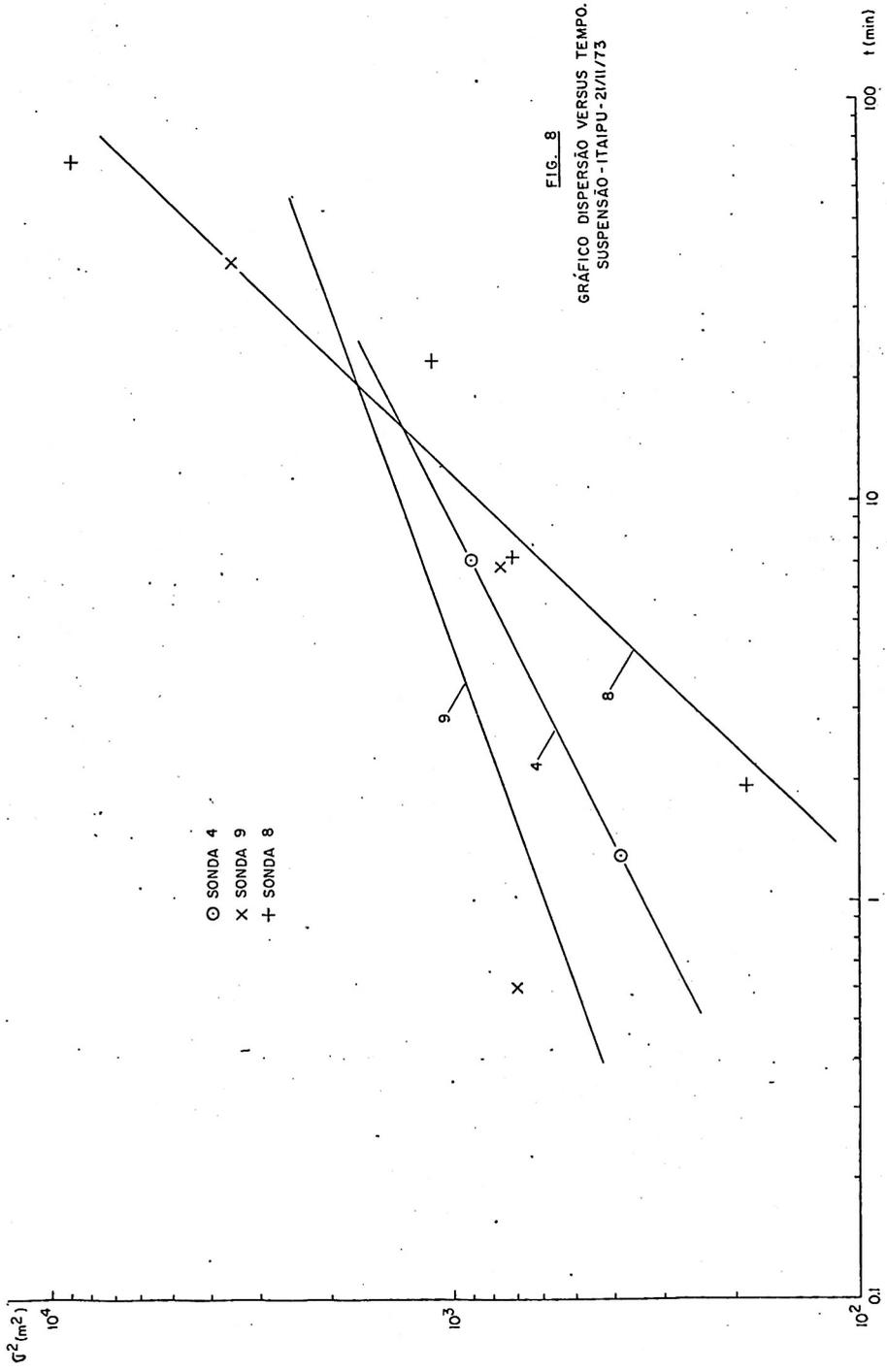


FIG. 8  
 GRÁFICO DISPERSÃO VERSUS TEMPO.  
 SUSPENSÃO - ITAIPU - 21/11/73

○ SONDA 4  
 X SONDA 9  
 + SONDA 8

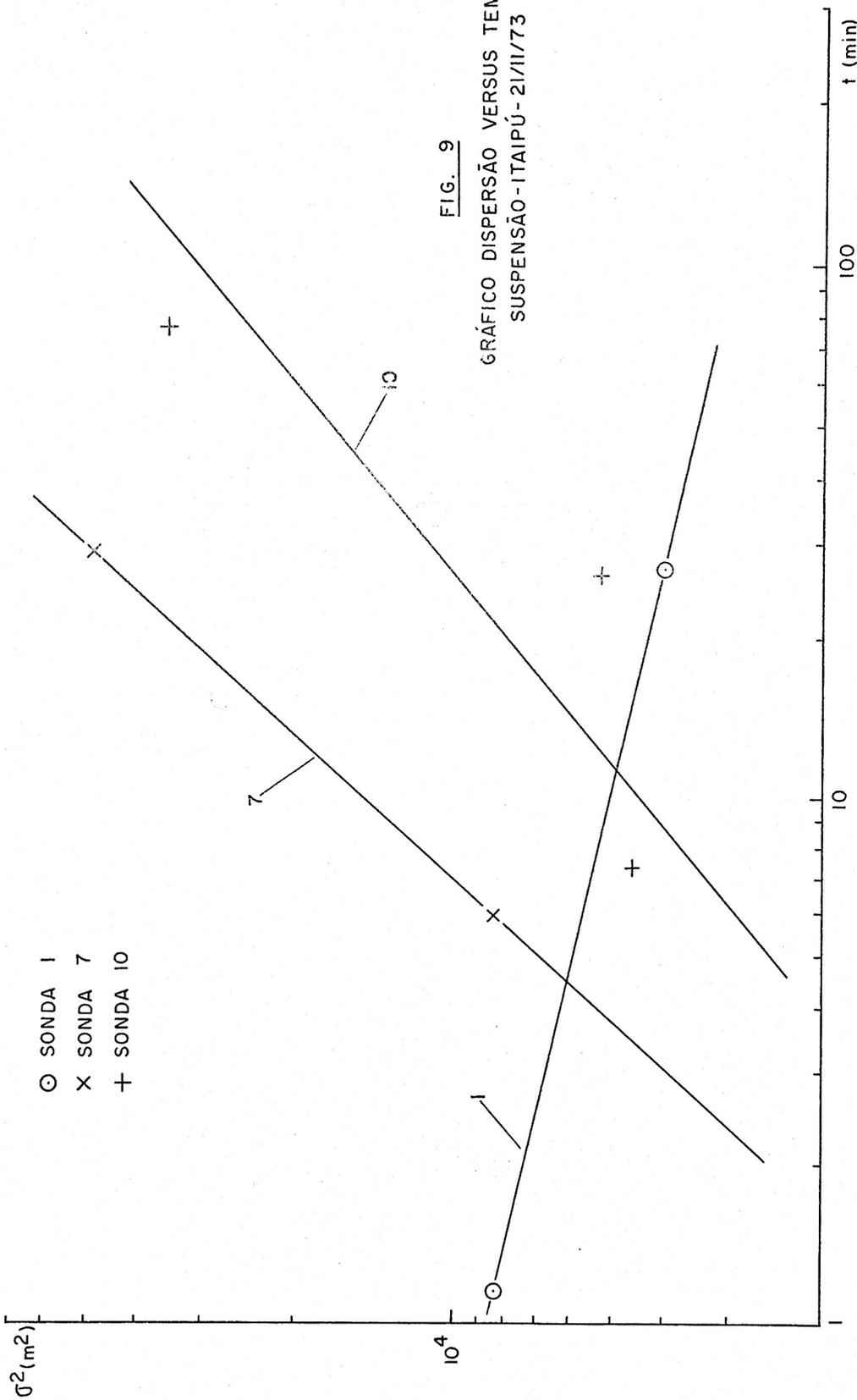


FIG. 9

GRÁFICO DISPERSÃO VERSUS TEMPO.  
 SUSPENSÃO-ITAIPÚ - 21/11/73

3.2. A CAMPANHA DE 28 E 29 DE JANEIRO DE 1974; NA  
ÁREA DA PONTA DA MUNDUBA.

A injeção de sedimento marcado (batelão Jabaquara) foi realizada no dia 28 de Janeiro, às 13 horas e 10 minutos. O mar apresentava-se calmo, com onda sul entre 0,5 m e 1 metro de amplitude, com um período entre 4 e 6 segundos. Soprava um vento sudoeste, fraco. Antes da injeção, foram realizadas medidas de corrente, cujos resultados aparecem na tabela 3.

TABELA 3

MEDIDAS DE CORRENTE		
Profundidade (m)	Velocidade (cm/s)	Direção (graus)
3,5	13,3	30
7,0	18,7	15
10,5	17,7	30
14,0	17,7	50

A atividade injetada foi de 3,1 curies, resultantes da irradiação de 5 g de ouro metálico.

Foram novamente utilizados dois barcos nesta detecção. O "Gaúcho V" transportava três sondas:

Sonda	Profundidade (m)
1	3,5
10	12
4	20

O "Gaúcho I" também utilizou três sondas:

Sonda	Profundidade (m)
7	4
8	12
2	20

No dia seguinte, uma detecção de fundo verificou o espalhamento do material, sendo analisada, como usualmente, pela aplicação do "método do balanço".

As sondas superficiais praticamente não detectaram atividade, a não ser em pequena quantidade e durante curtos períodos de tempo.

A sonda 4, a 20 m, detectou material por cerca de 700 m a partir do ponto de injeção, sendo nela observadas as mais altas atividades. A 9 minutos da injeção, esta sonda detectou um pico bastante ativo, com cerca de 150000 contagens por minuto. A sonda 10, situada a 12 m de profundidade, também detectou atividades apreciáveis a 40 minutos da injeção e a 400 m de distância.

Estes resultados, apesar de obtidos de barcos diferentes, permitem estabelecer a configuração geral da nuvem. O material injetado decantou-se seguindo a direção geral da corrente - quadrante NE -, espalhando-se por uma região com 700 m de comprimento por 400 m de largura. Os resultados da aplicação do "tratamento padrão" aos dados experimentais são apresentados na tabela 4.

A sonda 4 (20m) deu resultados tratáveis pelo modelo de Okubo-Pritchard. Este modelo foi também obtido nesta região, quando foi realizada uma injeção de bromo radioativo (Parte 3 deste relatório).

A sonda 2, à mesma profundidade, provavelmente não cobriu completamente a região ativa, não estando situada no barco destinado a realizar medidas.

Também no caso da sonda 8 (12m), o gráfico da dispersão versus o tempo indica a possibilidade de se utilizar um modelo do tipo Okubo-Pritchard. As curvas de isocontagem referentes às sondas 4 e 8 são apresentadas nas figuras 10 e 11.

A detecção de fundo foi realizada no dia 29/01, as suas curvas de isocontagem aparecem na figura 12 e o seu diagrama de transporte na figura 13.

O material espalhou-se pelo fundo em uma região com 1500 m de comprimento e cerca de 400 m de largura. O diagrama de transporte mostra uma recuperação de cerca de 400 mCi, muito inferior à atividade injetada.

Este resultado permite duas hipóteses:

- a) Grande parte do material fino, no qual está concentrada a maior porção da atividade, foi arrastado em suspensão.
- b) A carga do batelão atingiu o fundo de um modo compacto, blindando ela mesma a radioatividade das camadas inferiores.

A detecção de fundo do dia 29 de Janeiro foi excepcionalmente bem feita, mas as contagens encontradas na região do ponto de injeção foram muito inferiores às encontradas na região de Itaipú. A detecção do material em suspensão, apesar de ser de julgamento mais difícil, também foi aparentemente bem feita. A atividade da sonda 4 (20m) foi muito alta logo após o início da injeção (150000 c/min), caindo para 2000 c/min aos 40 minutos.

As sondas superficiais, por sua vez, praticamente não indicaram contagens. Estes dois fatores indicam um afundamento rápido do material. A sonda 10 (12m) achou atividades altas a 43 minutos da injeção, mas a uma distância de 400 metros.

Deste modo, a conclusão mais provável é que a

fração do material de diametro superior a  $20\mu$  e a parte dele aglomerada pela dragagem depositam-se rapidamente. A parte fina, entre 5 e  $20 \mu$ , teve algum movimento em suspensão, mas as baixas atividades encontradas parecem ser devidas ao enterramento da maior parte do material radioativo.

Outra injeção em suspensão foi realizada, no mesmo local, no dia 31 de Janeiro; como não se tratava de material de assoreamento puro, ele depositou-se muito rapidamente. Neste dia, o habitual escurecimento da água do mar, causada pelo sedimento em suspensão, não foi notado. Deste modo, a detecção realizada mostrou que o material se depositava quase instantaneamente. Por esta razão, a detecção de 31 de Janeiro deixa de ser tratada de talhadamente.

TABELA 4

SONDA	NUVEM	t (min)	CONTAGEM MÁX. (C/min)	M'	1nP'	$\sigma^2$ (m <sup>2</sup> )	M''	1nP''
10 (12m)	1	9,4	2370	2,304	2,609	463	0,468	5,089
	2	43	78695			943		
2 (20m)	1	1,17	4096	-0,211	8,243	121	0,533	4,38
	2	8,7	1770			671		
	3	26,1	2320			551		
8 (12m)	1	8,3	6580	-0,797	10,121	304	1,741	2,758
	2	13,8	2044			1770		
	3	21,8	1723			16390		
	4	40,7	1674			3640		
4 (20m)	1	8,9	146970	-1,992	16,04	94	1,796	4,236
	2	45	2359			168		
	3	78,3	1871			177		
	4	101,2	1265			120		

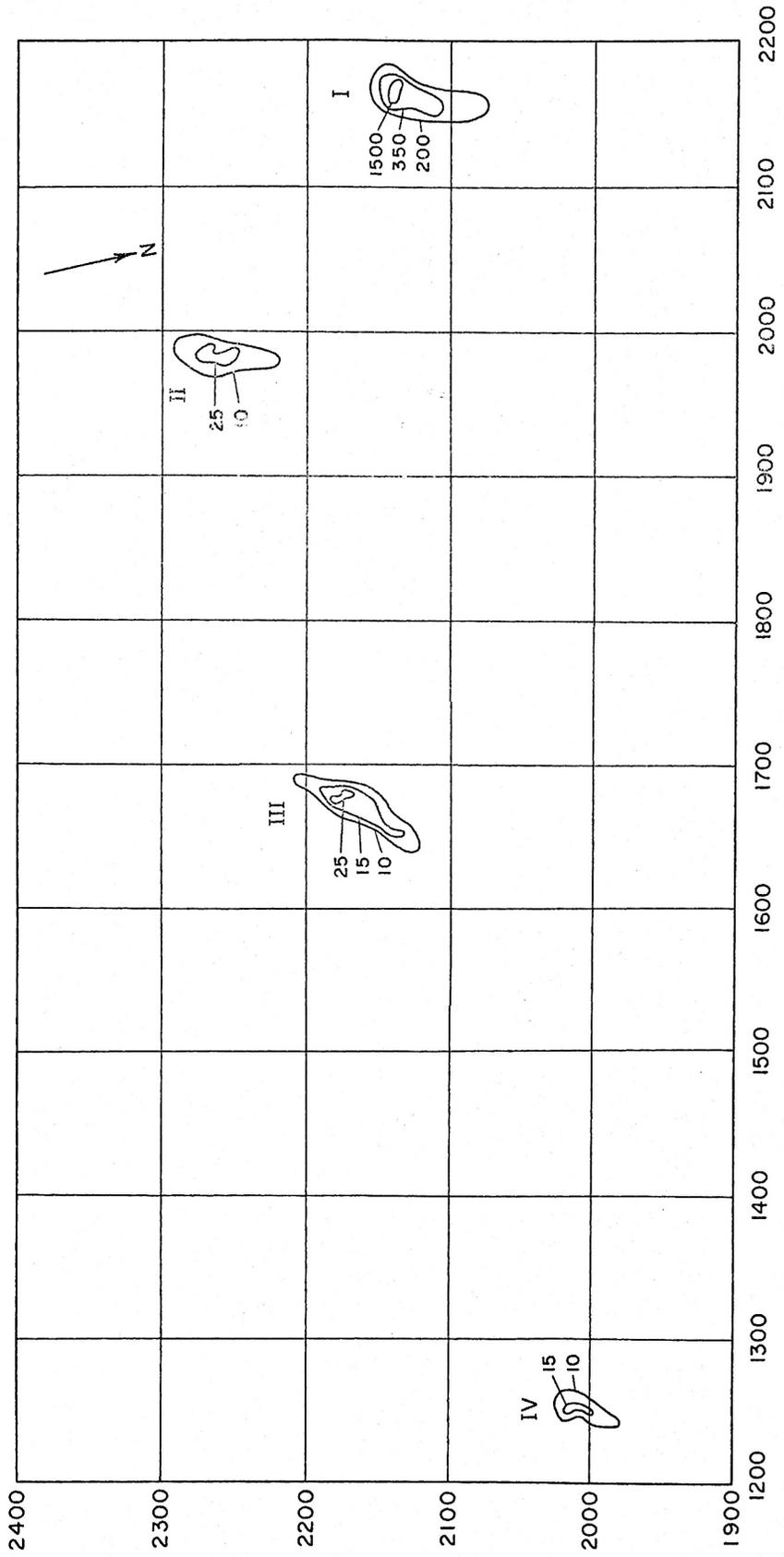


FIG. 10 - CURVAS DE ISO-CONTAGEM - MEDIDA DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO ~ SONDA 4, PROF. 20 m  
MUNDUBA - 28/01/74

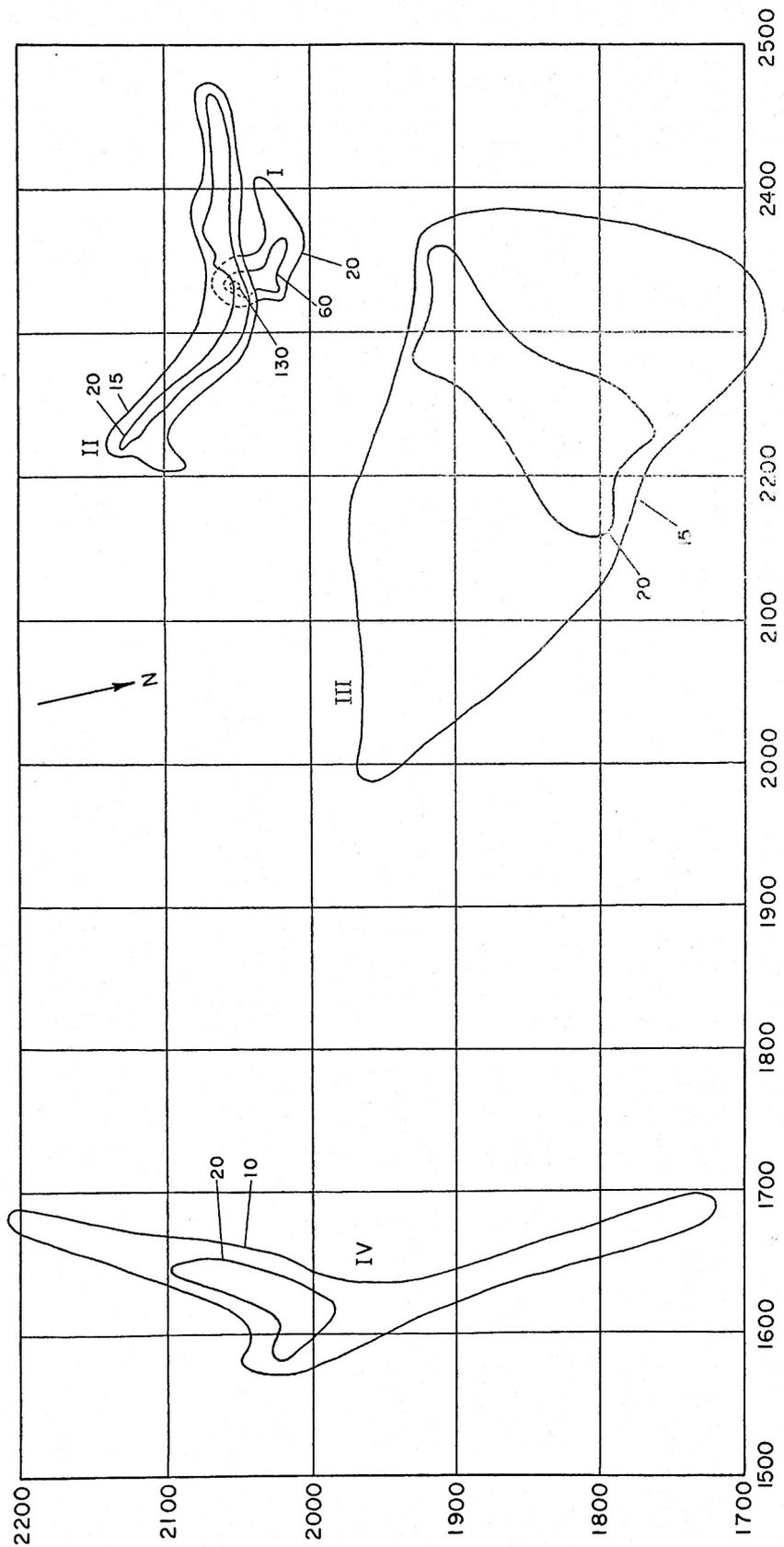


FIG. II - CURVAS DE ISO-CONTAGEM - MEDIDA DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO - SONDA 8, PROF. 12 m  
MUNDUBA - 28/OI/74

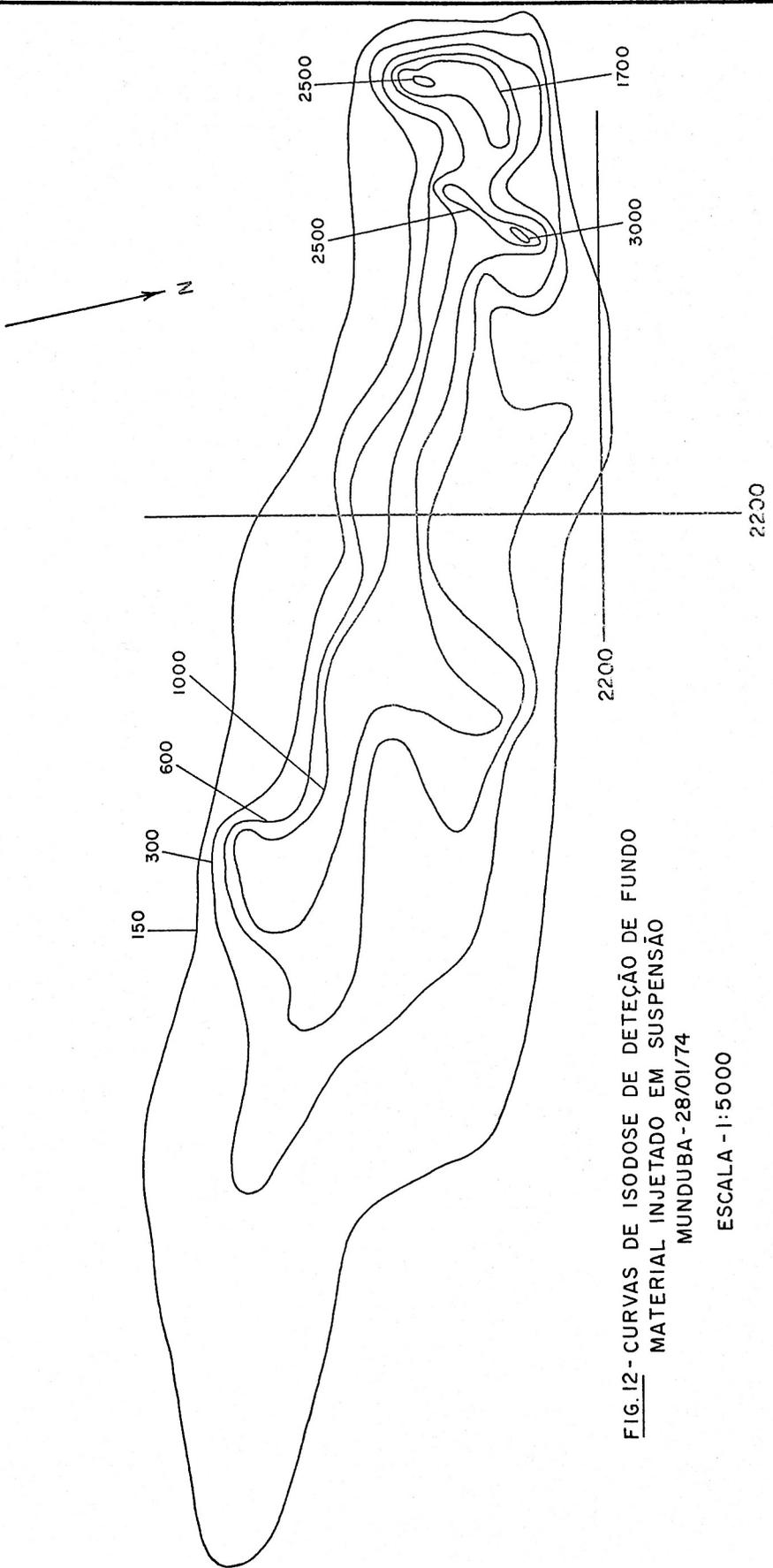


FIG.12 - CURVAS DE ISODOSE DE DETEÇÃO DE FUNDO  
MATERIAL INJETADO EM SUSPENSÃO  
MUNDUBA - 28/01/74

ESCALA - 1:5000

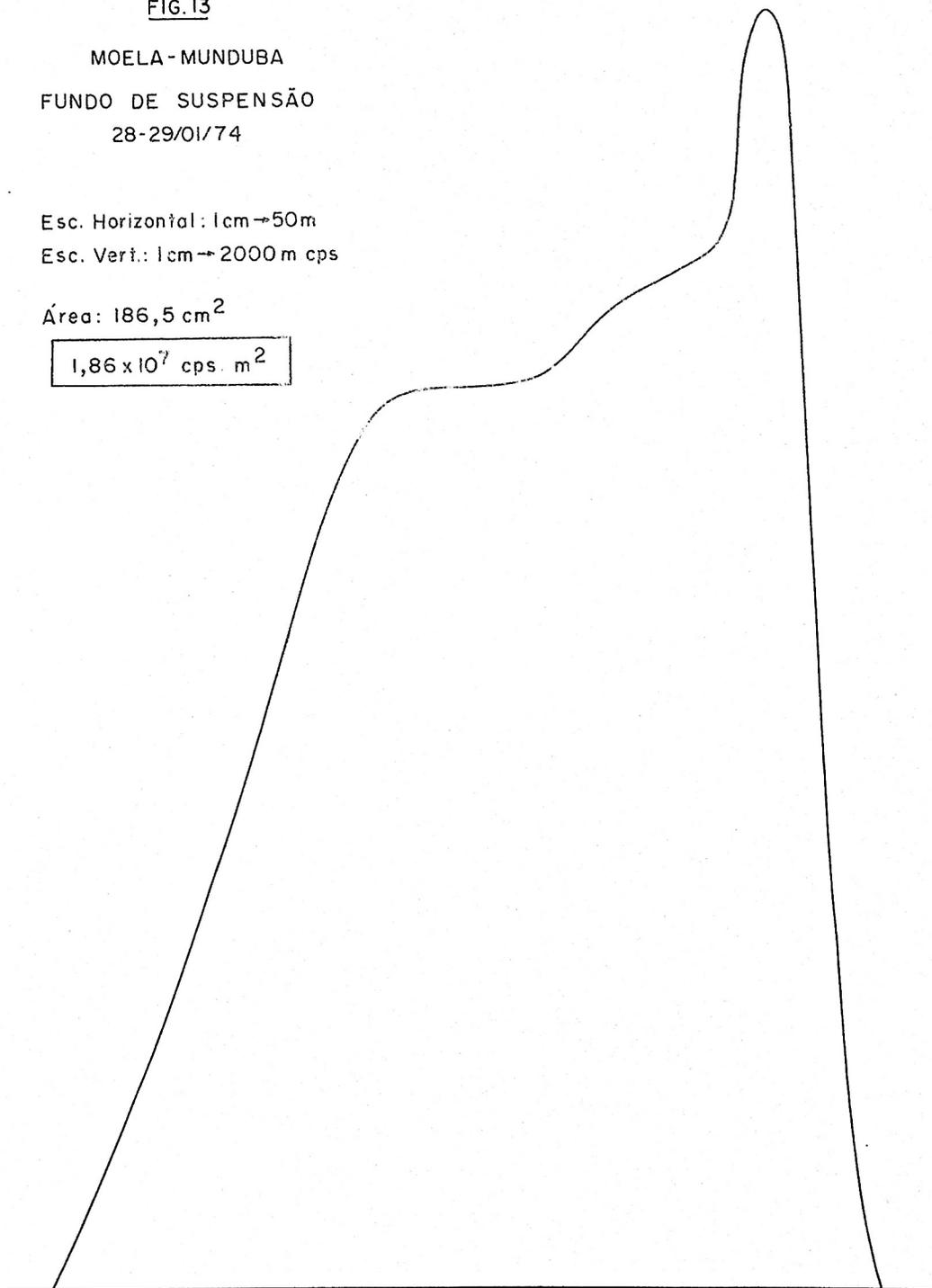
FIG. 13

MOELA - MUNDUBA  
FUNDO DE SUSPENSÃO  
28-29/01/74

Esc. Horizontal: 1cm → 50m  
Esc. Veri.: 1cm → 2000 m cps

Área: 186,5 cm<sup>2</sup>

1,86 x 10<sup>7</sup> cps. m<sup>2</sup>



3.3. A CAMPANHA DE 1º, 2 E 3 DE OUTUBRO DE 1973,  
NA ÁREA DA PONTA DE ITAIPÚ.

Foi realizada, em 1º de Outubro de 1973, a injeção de um batelão contendo cerca de 500 m<sup>3</sup> de vasa, proveniente da região do Saboó, na área em estudo próximo à Ponta de Itaipú. Tratava-se de material de assoreamento recente, com compactação moderada.

A atividade injetada foi de 1,3 curies de ouro 198.

A detecção foi acompanhada por dois barcos. Os resultados obtidos foram semelhantes, de modo que, neste relatório, trataremos dos dados coletados pelo "Gaúcho I". Este transportava três sondas:

Sonda	Profundidade (m)
8	3
4	7
10	11

Em vista do correntômetro apresentar defeito, não foi possível a execução de medidas de corrente.

Os dados obtidos foram tratados da maneira habitual, utilizando-se o tratamento padrão.

Nos dias 2 e 3 de Outubro, foi realizada a de

tecção de fundo do material injetado em suspensão, sendo os dados tratados pela aplicação do método do balanço.

A figura 14 mostra o gráfico semi-logarítmico da taxa de contagem de cada curva de isocontagem versus a  $\bar{a}$  rea envolvida por ela, para a sonda 10, à profundidade de 11 metros.

As retas obtidas confirmam, neste caso, que se obtém uma distribuição gaussiana para a concentração do material, a esta profundidade. As figuras 15, 16 e 17 apresentam os gráficos das taxas de contagem máximas, obtidas para cada curva em função do tempo, num gráfico duplamente logarítmico. Os coeficientes angulares das figuras 15 e 17 são da ordem de 1, o que indica a utilização de um modelo de Fick. A figura 16 mostra um valor do coeficiente angular próximo de 2, indicando um modelo de Okubo Pritchard. As curvas de isodose são apresentadas nas figuras 18, 19 e 20.

O gráfico da dispersão  $\sigma^2$  versus o tempo, para a sonda 10 fornece um coeficiente angular 1,007, se desprezarmos a  $1^a$  das três curvas de isodose da figura 20. Isso indica novamente um modelo bidimensional do tipo Fick, tal como o obtido após a injeção de bromo radioativo (Parte 3 deste relatório).

Aplicando-se as expressões já utilizadas em (3.1)

$$D_x = - \frac{1}{4\pi mt} \cdot \frac{a_1}{a_2}$$

$$\frac{D_x}{D_y} = - \frac{1}{4\pi mt} \cdot \frac{a_2}{a_1}$$

para calcular os coeficientes de difusão, para a sonda a 11 m de profundidade, obtem-se

$$D_x = 2,53 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$D_y = 0,17 \text{ m}^2/\text{s}$$

Neste caso, chamamos  $D_x$  o coeficiente angular na direção de maior dispersão. Aparentemente, a difusão seria grande nesta direção e pequena na direção que lhe é perpendicular.

Pode-se observar, como a injeção não foi realizada em um ponto único - já que o batelão não se esvazia instantaneamente - que a primeira nuvem detectada tem praticamente o eixo maior igual ao comprimento de injeção. Em seguida, a corrente transporta esta nuvem no sentido oeste. Durante este movimento, há dispersão do traçador, produzindo a expansão da nuvem.

O movimento foi observado até 300 m do ponto de injeção, ainda com atividades apreciáveis. A utilização do modelo de Fick permite a previsão das dimensões da nuvem em instantes posteriores. A sua velocidade de deslocamento é de 17 cm/s, compatível com os valores da corrente encontrados na área, em outras datas.

Apresentemente, uma parte do material descarregado vai para o fundo, logo após a descarga e parte da fração mais fina, na qual está concentrada grande parte da atividade, move-se com a corrente, decantando-se lentamente.

A detecção de fundo posterior mostrou o material espalhado por uma área de 3,5 por 3 quilômetros, e a recuperação calculada é próxima da atividade injetada.

Neste caso, a área coberta pelo material foi bastante grande, apesar de se acreditar que praticamente toda a fração acima de  $30\mu$  deposita-se nas proximidades do ponto de injeção.

FIG. 14 - TAXA DE CONTAGEM DE CADA CURVA DE ISODOSE VERSUS ÁREA

ITAIPU - 01/10/73  
SONDA 10, 11 m

- + CURVA 1
- CURVA 2
- CURVA 3

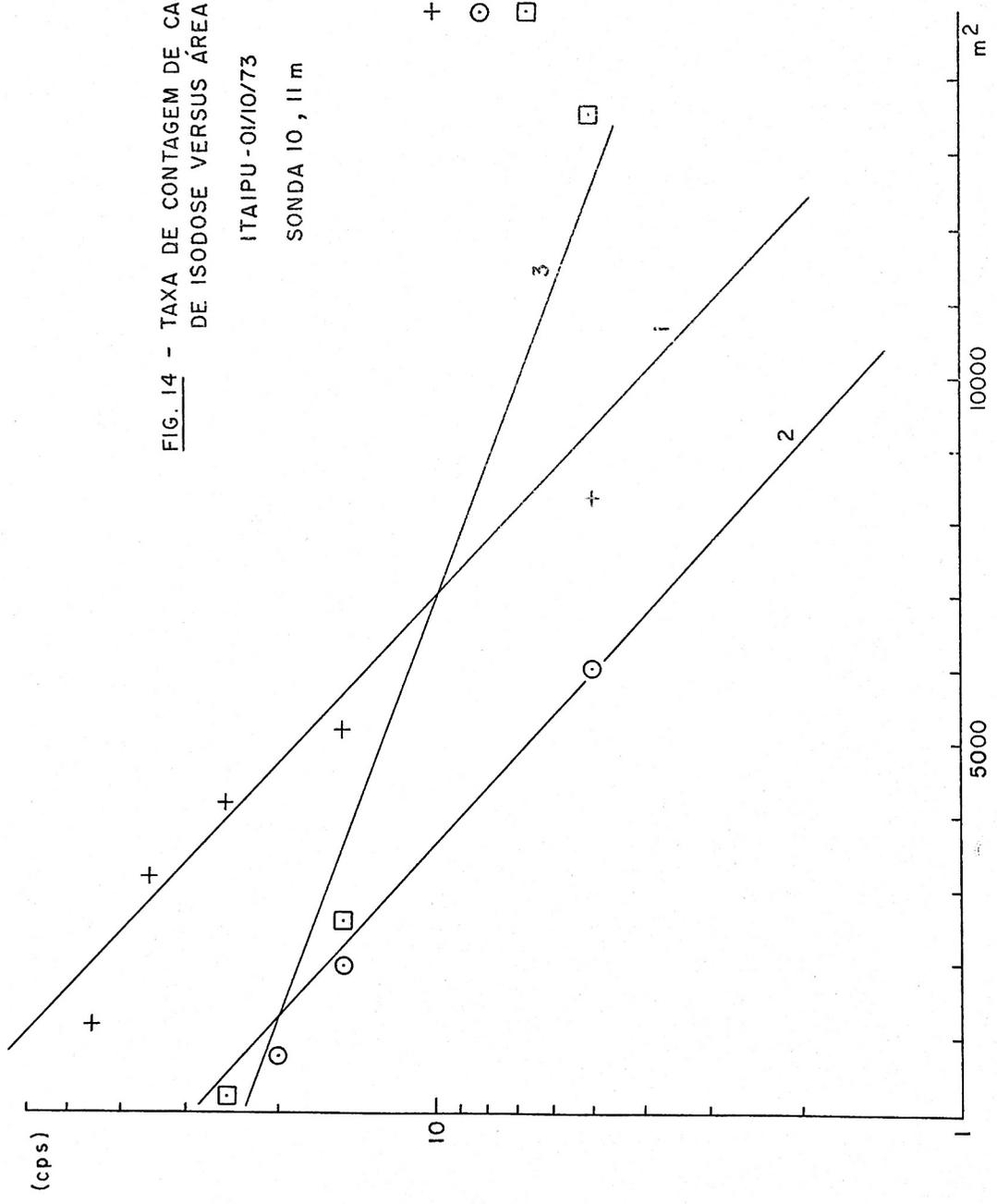


FIG. 15 - GRÁFICO DE TAXA DE CONTAGEM  
MÁXIMA VERSUS TEMPO

ITAIPU - 01/10/73

SONDA 8

PROF. 3 m

$$\ln y = -0,651 \ln t + 8,14$$

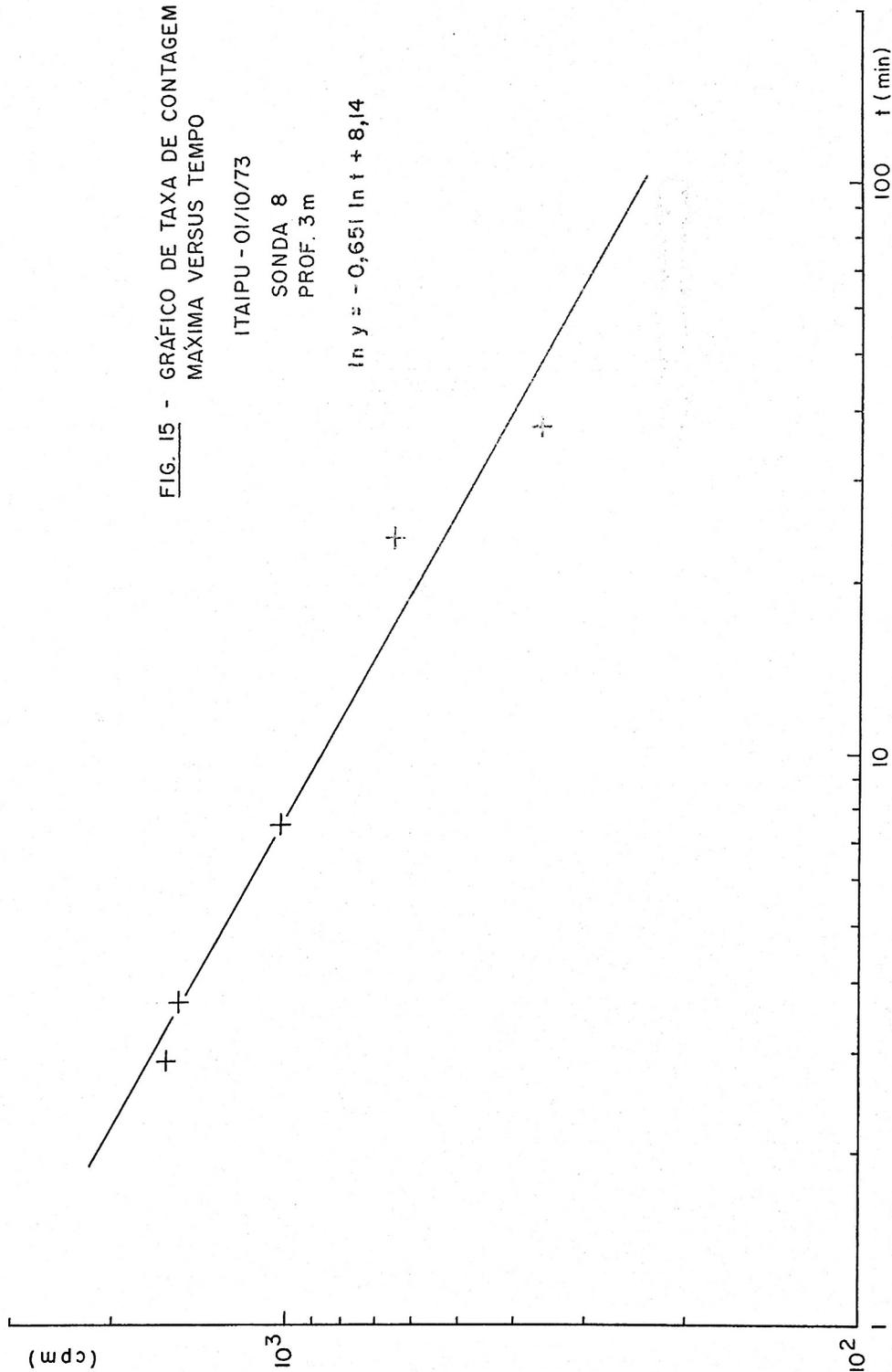


FIG. 16 - GRÁFICO DE TAXA DE CONTAGEM  
MÁXIMA VERSUS TEMPO

ITAIPU - 01/10/73

SONDA 4

PROF. 7 m

$$\ln y = -1,84 \ln t + 12,70$$

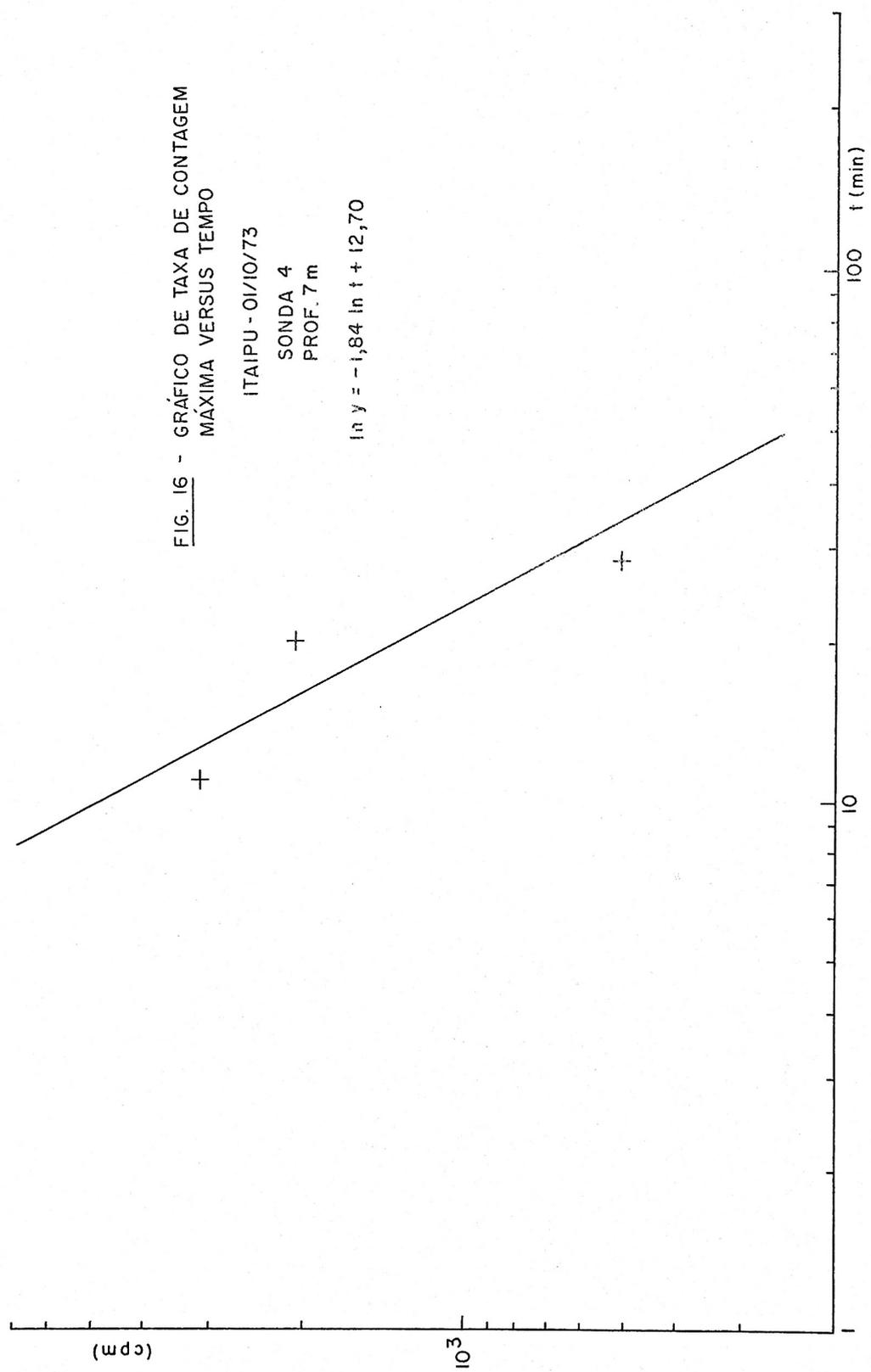
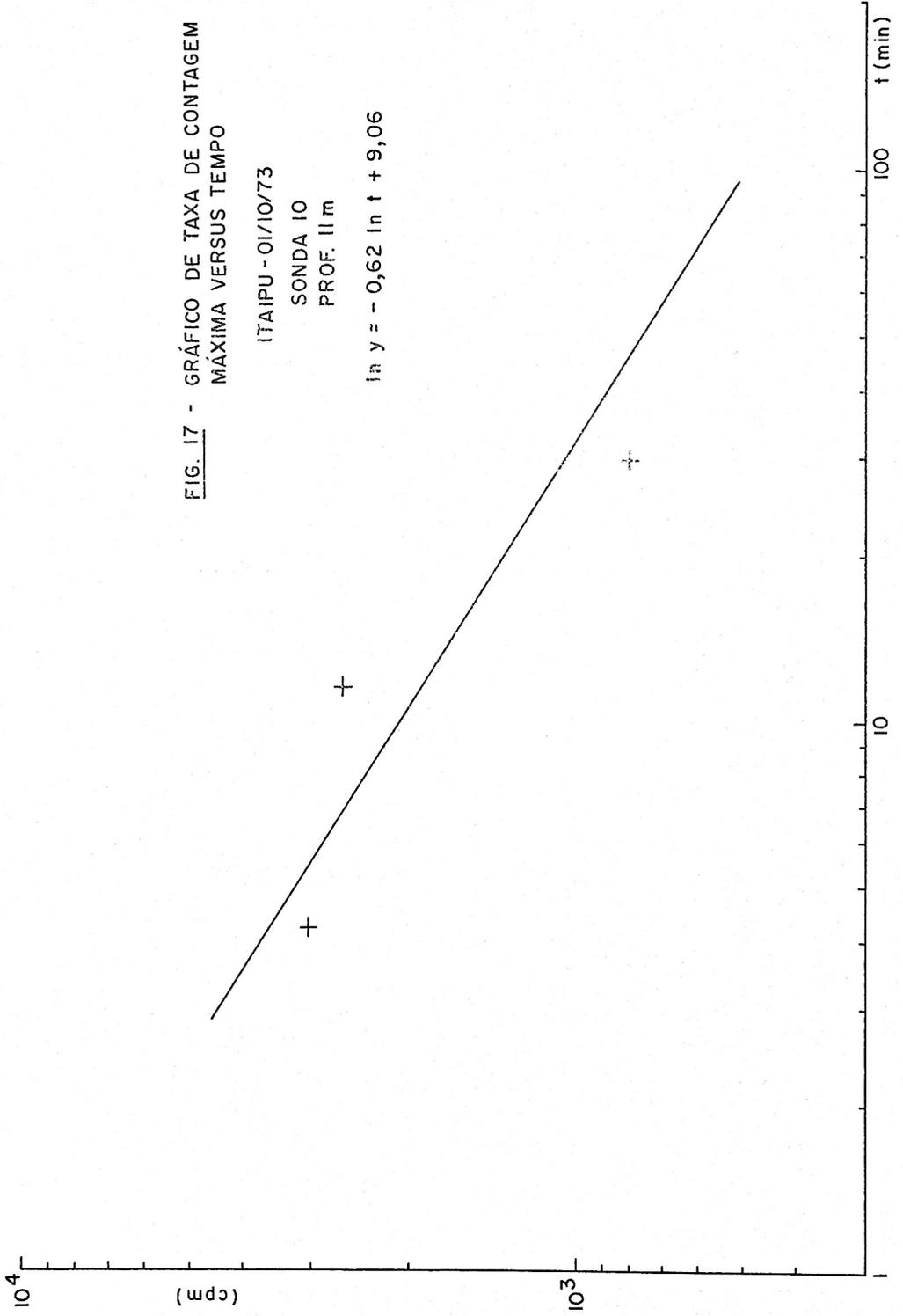


FIG. 17 - GRÁFICO DE TAXA DE CONTAGEM  
MÁXIMA VERSUS TEMPO

ITAIPU - 01/10/73  
SONDA 10  
PROF. 11 m

$$\ln y = -0,62 \ln t + 9,06$$



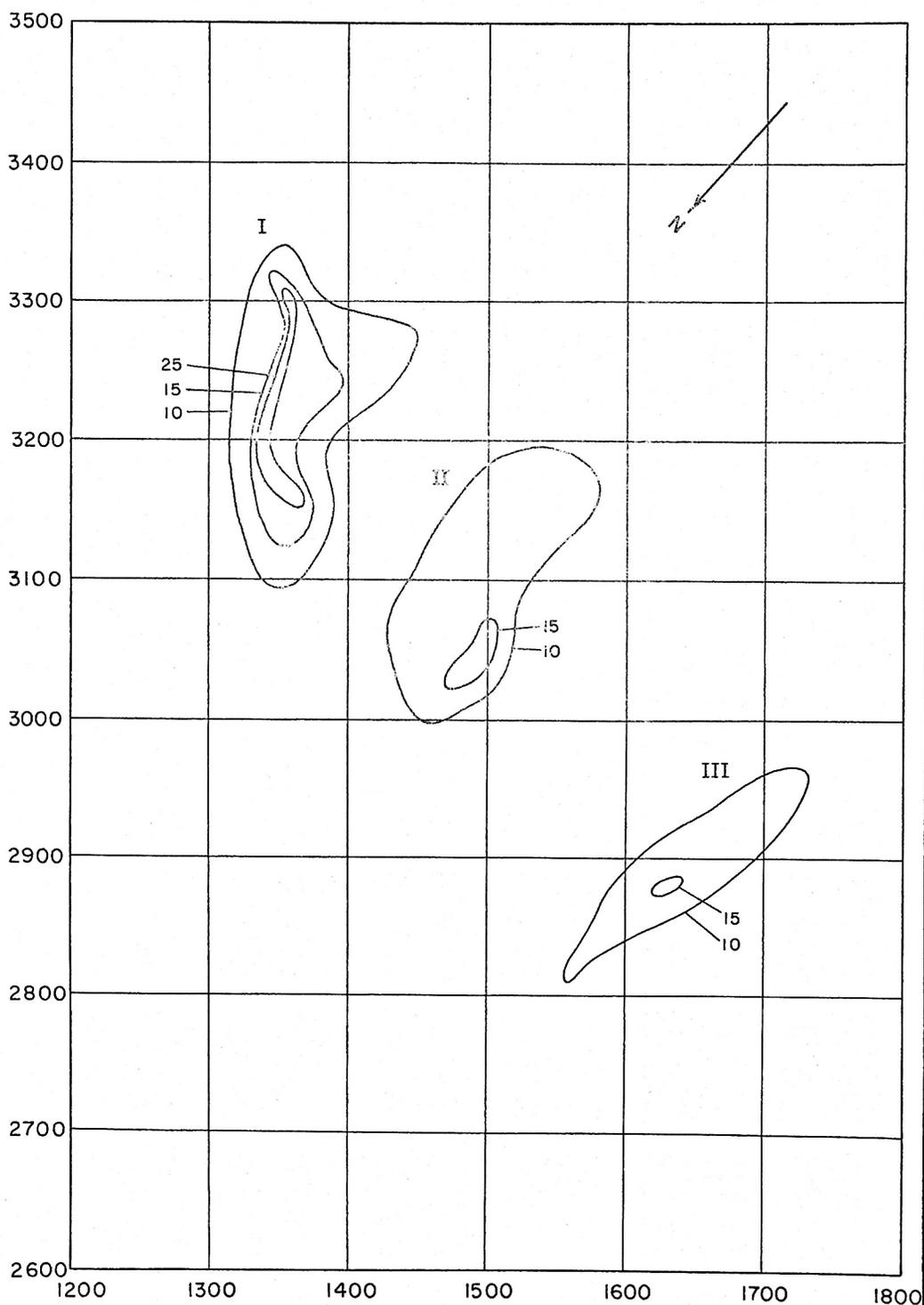
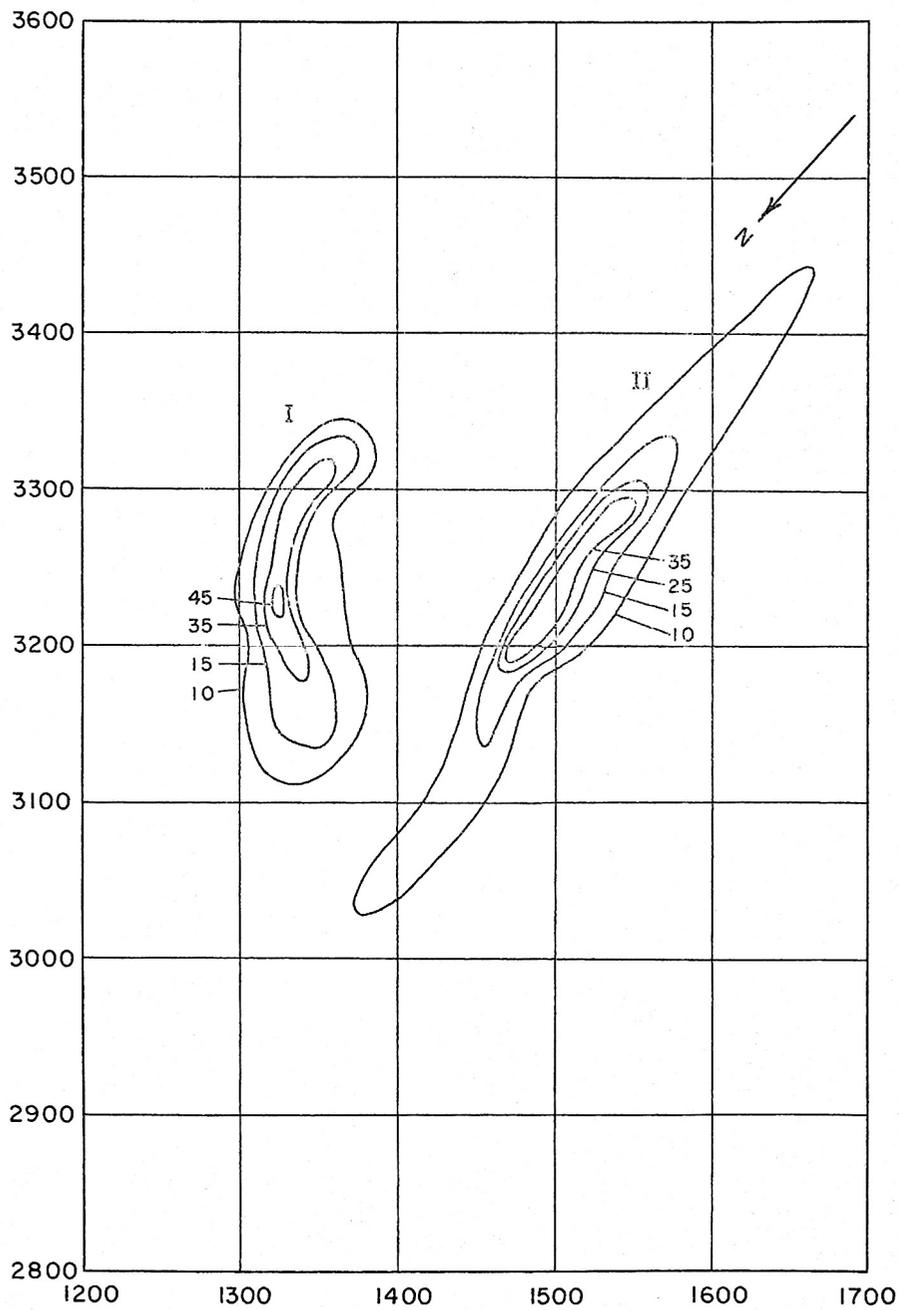


FIG. 18

CURVAS DE ISOCONTAGEM  
ITAIPU - 01/10/73 - SONTA 8, 3m



**FIG. 19**

**CURVAS DE ISOCONTAGEM  
ITAIPU - 01/10/73 - SONDA 4 , 7m**

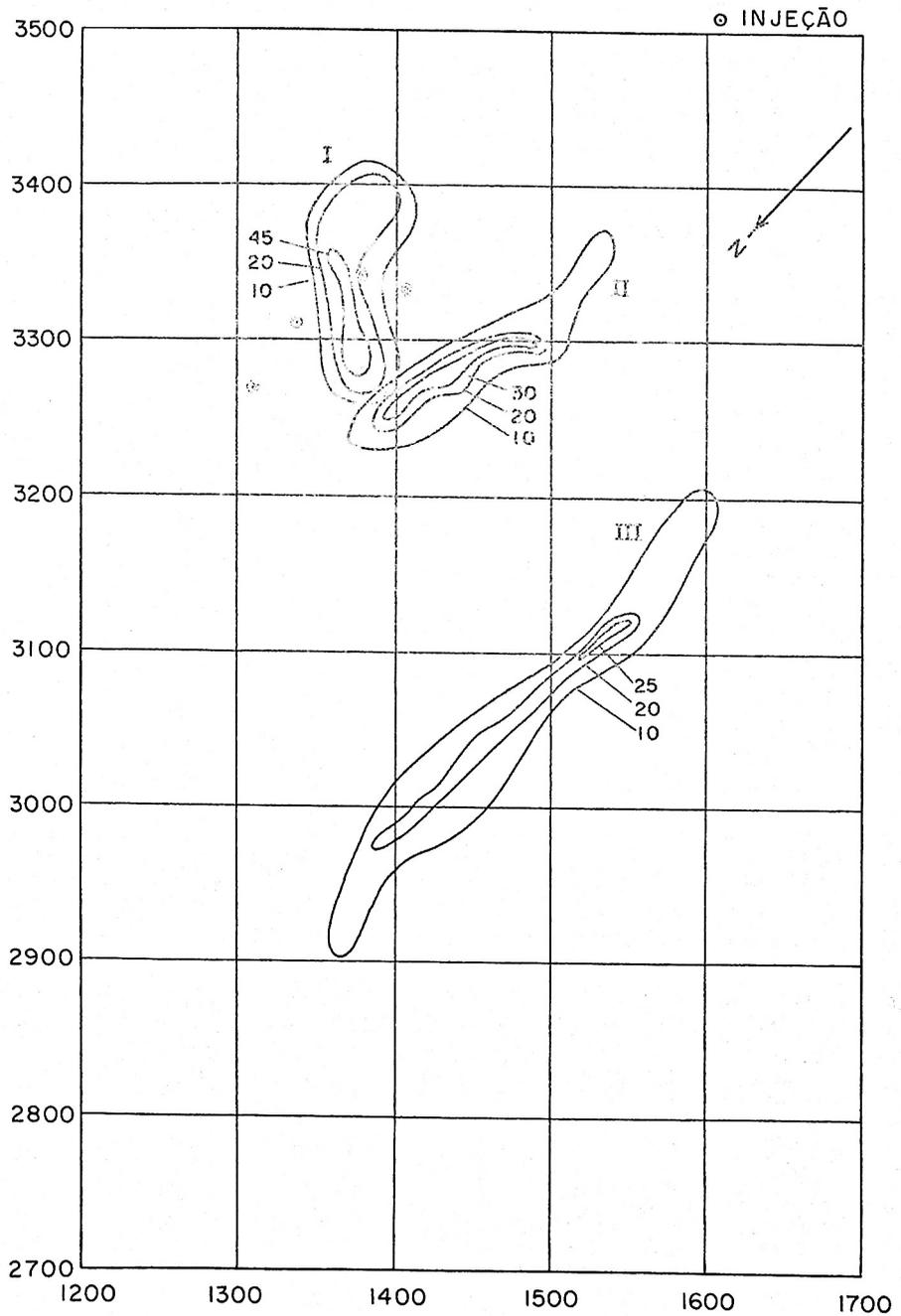


FIG. 20

CURVAS DE ISOCONTAGEM  
 ITAIPU - 01/10/73 - SONDA 10, 11m

#### 4. CONCLUSÕES PRELIMINARES.

Foram analisadas três medidas de sedimento em suspensão, sendo duas na região de Itaipũ e uma na área da Munduba.

Em Itaipũ, o movimento observado nos dois trabalhos manteve-se na direção leste-oeste, com sentidos de movimento opostos. Em Novembro, o material depositou-se no fundo em uma área quase retangular, de 1400m por 500 metros. Em Outubro, a área de espalhamento foi muito maior, cerca de 3500m por 3000m, sendo o movimento em suspensão feito à velocidade de cerca de 20 cm/s. Em ambas, o modelo aplicável ao movimento da fração fina do material era um modelo do tipo Fick, bidimensional.

Na Ponta da Munduba, o movimento se deu na direção NE, e a detecção em suspensão acompanhou a nuvem até as dimensões de 700m por 400m, durante cerca de uma hora e meia. O espalhamento no fundo cobriu uma área de 1500m por 400m. O modelo aplicável para o movimento em suspensão da fração fina é o de Okubo-Pritchard.

Em todos os casos, a fração mais importante do material depositou-se sob a trajetória de descarga do batelão. Entretanto, uma parte da fração fina presente move-se em suspensão.

O espalhamento do material depende fortemente de sua natureza. Além disso, o tipo de dragagem influi grandemente no espalhamento; no caso estudado, a formação de grandes blocos durante a dragagem facilitou a rápida deposição.

Os modelos matemáticos de dispersão, aplicáveis às duas regiões e determinados por injeções de bromo radioativo, são confirmados nesta parte do trabalho, sendo aplicáveis geralmente às sondas mais profundas.

As sondas superficiais cessam rapidamente de detectar radioatividade, o que confirma a deposição rápida do material.

5. CONCLUSÕES GERAIS DAS EXPERIÊNCIAS RADIOATIVAS NOS POSSÍVEIS FUTUROS LOCAIS DE DESPEJO AO LARGO DE SANTOS.

5.1. O material dragado no estuário e injetado no fundo, na Ponta da Munduba, teve movimentação desprezível. O centro de gravidade da correspondente mancha radioativa deslocou-se de cerca de 100 m em 72 dias (15 de Novembro de 1973 a 26 de Janeiro de 1974), para leste. A correspondete vazão sólida de fundo foi de 200 kg/m/dia, o que corresponde a cerca de 0,025% do volume despejado por um batelão com capacidade de 500m<sup>3</sup>.

5.2. Fizeram-se duas injeções de fundo na área de Itaipũ com material dragado no estuário. Em ambos os casos o material foi marcado com Au 198 e movimentou-se rapidamente. Na primeira experiência (13 a 19 de Dezembro de 1973), o centro de gravidade da mancha radioativa deslocou-se de 450 m, sendo de 10 ton/m/dia a vazão sólida correspondente. Na segunda experiência (18 a 22 de Janeiro de 1974), o centro de gravidade da mancha radioativa deslocou-se de cerca de 1000m e a vazão sólida correspondente variou entre 10 e 30 ton/m/dia.

5.3. Nas duas experiências de fundo efetuadas na área de Itaipũ o deslocamento do centro de gravidade da mancha radioativa se fez para o Norte, fazendo temer que o materiial ali despejado reingresse na circulação sólida da Baía

de Santos.

5.4. As medições de correntes disponíveis nas áreas em estudo com traçadores radioativos ao largo da Baía de Santos, são:

- a. medidas de corrente em uma vertical, próxima ao local de lançamento do traçador, realizadas em sua maioria pelo IPR/CBTN um pouco antes da execução dos trabalhos experimentais (principalmente os de sedimentos em suspensão), com a finalidade de prever a direção de movimentação de material e, dessa maneira, dar uma orientação inicial aos dois barcos utilizados na detecção da nuvem radioativa (Apêndice 2).
- b. medidas de corrente na região da Ponta do Munduba efetuadas pelo INPH/DNPVN entre 9/06 e 13/06/72.

O panorama geral de circulação de águas nos locais em estudo seria determinado, em resumo, através do relacionamento entre:

- I. medições de correntes efetuadas simultaneamente em diversos pontos, durante ciclos completos de maré, e a caracterização de sua variação na vertical.

II. dados que caracterizassem o regime de ondas, ventos e marés. Poderia então ser estudada a variação da velocidade e direção da corrente, no tempo e no espaço, e o seu relacionamento com os dados registrados de ondas, marés e ventos.

Entretanto devido ao número limitado de medidas de corrente não foi possível estabelecer o panorama da circulação de águas nos locais em estudo para o futuro despejo de material dragado. O conhecimento do regime de circulação de águas é ecessário para a extrapolação dos resultados das medidas efetuadas com traçadores e/ou para a escolha das condições mais desfavoráveis em relação ao retorno de material à região dragada ou ao caminhamento do material para outro local indesejado.

5.5. Entretanto um fato emerge claramente: a mobilidade muito maior no fundo do material despejado na zona de Itaipũ em relação ao despejado na zona de Munduba. As experiências em ambos os locais foram efetuadas na mesma época do ano e os resultados acima apontados documentam tal fato.

5.6. O material despejado em suspensão na Ponta da Munduba, em 18/01/74, em meia maré enchente, em quadratura, com vento SW e mar calmo, apresentou algum deslocamento para leste. No mesmo dia, cerca de duas horas depois, foi encontrado em depósito em área de cerca de 1500 m de comprimento por aproximadamente 400 m de largura.

5.7. Nas duas experiências de suspensão efetuadas na zona de Itaipú (01 de Outubro e 21 de Novembro de 1973) o material acabou por se depositar, tendo-se encontrado boa concordância entre a atividade injetada e a detectada na zona de deposição.

5.8. Tendo em vista a deposição relativamente rápida do material despejado em suspensão tanto na zona da Mundaba quanto na de Itaipú, confirma-se a vantagem da primeira sobre a segunda. Com efeito, aplica-se ao material de positado a conclusão anterior, relativa a material de fundo.

5.9. Cumpre assinalar que os resultados acima estão sujeitos às seguintes limitações:

- a) As experiências, em número limitado, se fizeram apenas praticamente em regime de verão;
- b) O material marcado e injetado em suspensão havia sido dragado unicamente por dragas de alcatruzes, não se tendo marcado outros tipos de dragas suspeitas de a carretar maior desagregação do material dragado.

## APENDICE 1

A lei de Stokes é expressa por:

$$V = g \frac{(\rho - \rho_F) d^2}{18\eta} \quad (1),$$

onde:  $V$  é a velocidade de queda da partícula de diâmetro  $\underline{d}$ , em cm/s.

$g$  é a aceleração da gravidade.

$\rho$  e  $\rho_F$  são as densidades do sólido e do fluido, em  $g/cm^3$

$\eta$  é a viscosidade do fluido, em poises.

Para tornar aplicáveis as hipóteses que serão feitas, a curva granulométrica do material é dividida em trechos lineares, tal como apresentado na figura 1-APX.

Admite-se que a curva é composta por três trechos lineares, cujas equações são:

$$p(d) = \frac{d}{15 \times 10^{-4}} - \frac{1}{3} \quad (2)$$

2.

$$p(d) = \frac{d}{7 \times 10^{-3}} - \frac{2}{7} \quad (3)$$

$$p(d) = \frac{d}{6 \times 10^{-3}} - \frac{3}{2} \quad (4)$$

Nestas expressões,  $d$  é o diâmetro da partícula, em centímetros, e  $p(d)$  é a proporção, em massa, de partículas de diâmetro inferior a  $d$ .

Se utilizarmos os modelos de dispersão no cálculo da concentração de traçador em um ponto qualquer, obteremos um valor  $C$ . Entretanto, parte do material se decanta, modificando a concentração no ponto estudado para um valor  $C'$ , tal que:

$$C' = KC \quad (5)$$

O valor de  $K$  será calculado de dois modos diferentes, admitindo-se, no primeiro caso, a total ausência de homogeneização vertical. O coeficiente  $K_1$ , para esta hipótese, terá a mesma forma que a lei de distribuição mássica; para a distribuição dada por (2), teríamos

$$K_1 = \frac{d}{15 \times 10^{-4}} - \frac{1}{3}$$

3.

Colocando-se a lei de Stokes sob a forma

$$V = 8,6 \times 10^3 d^2 \quad (6)$$

e sendo  $H_0$  a profundidade de injeção, teríamos

$$\frac{H_0}{t} = 30,96 \times 10^6 d^2 \quad (7)$$

e

$$d = \frac{1}{(30,96 \times 10^6)^{1/2}} \left( \frac{H_0}{t} \right)^{1/2} \quad (8)$$

Finalmente

$$K_1^1 = 0,120 \left( \frac{H_0}{t} \right)^{1/2} - \frac{1}{3} \quad (9)$$

Para os outros dois ramos da curva granulométrica,

$$K_1^2 = 0,026 \left( \frac{H_0}{t} \right)^{1/2} - \frac{2}{7} \quad (10)$$

$$K_1^3 = 0,030 \left( \frac{H_0}{t} \right)^{1/2} - \frac{3}{2} \quad (11)$$

Fazendo-se variar o tempo, obteremos as curvas que expressam  $K_1$  em função de  $t$  e que são apresentadas na figura 2 APX, para a profundidade  $H_0 = 15$  m.

A segunda hipótese para o cálculo de  $K$  supõe que o mar atua como um misturador perfeito, o que produz uma homogeneização vertical instantânea. Neste caso, no intervalo de tempo  $(t, t + dt)$  desaparece a massa  $d^2m$  de partículas com diâmetros entre  $d$  e  $d + d(d)$ .

$$d^2m = v(d) \times d [ p(d) ] \times C dt$$

Para a lei expressa na formula (2)

$$d^2m = \frac{8600 \times 3600 d^2 \times d(d) \times C dt}{15 \times 10^{-4}}$$

Por integração entre os diâmetros máximo e mínimo da faixa considerada, obtem-se

$$d = 54,18 C dt \quad (12)$$

como

$$\frac{dC}{C} = \frac{dm}{GH}$$

e

$$K_2 = \frac{C}{C_0},$$

obtem-se

$$K_2^1 = e^{-\frac{54,18}{H_0} t} \quad (13)$$

Do mesmo modo,

$$K_2^2 = e^{-\frac{1063t}{H_0}} \quad (14)$$

e

$$K_2^3 = e^{-\frac{13653t}{H_0}} \quad (15).$$

As curvas que representam  $K_2$  em função do tempo, para uma profundidade  $H_0 = 15\text{m}$ , são apresentadas também na figura 2 APX.

A concentração medida deve estar entre os valores de  $C'$  calculados a partir de  $K_1$  e  $K_2$ , que representam casos extremos.

Um exame da figura 2 APX mostra que a fração mais fina do material praticamente não sofre decantação no período de 3 horas, da ordem dos tempos experimentais.

A fração mais grossa decanta-se rapidamente.

É possível calcular-se qual a atividade contida em cada uma dessas sub-frações, sabendo-se que a marcação com ouro é proporcional à superfície total do material marcado. Por este cálculo, verifica-se que a fração mais fina, entre 5 e 20 microns, deveria conter cerca de 80% da atividade injetada, ficando cada uma das outras com cerca de 5%.

Neste caso, o problema poderia ser tratado praticamente como um caso de difusão turbulenta, tal como o apresentado na terceira parte deste relatório. Entretanto, o próprio método de dragagem aglomera o material em pedaços maiores, que se decantam rapidamente.

Além disso, a formação de flocos pela descarga da vasa em água salgada apressa a sedimentação das partículas finas. Não é de se esperar, portanto, que os modelos de difusão, mesmo acoplados à lei de Stokes, sejam aplicáveis diretamente ao presente estudo. O problema deve ser tratado de um modo puramente experimental.

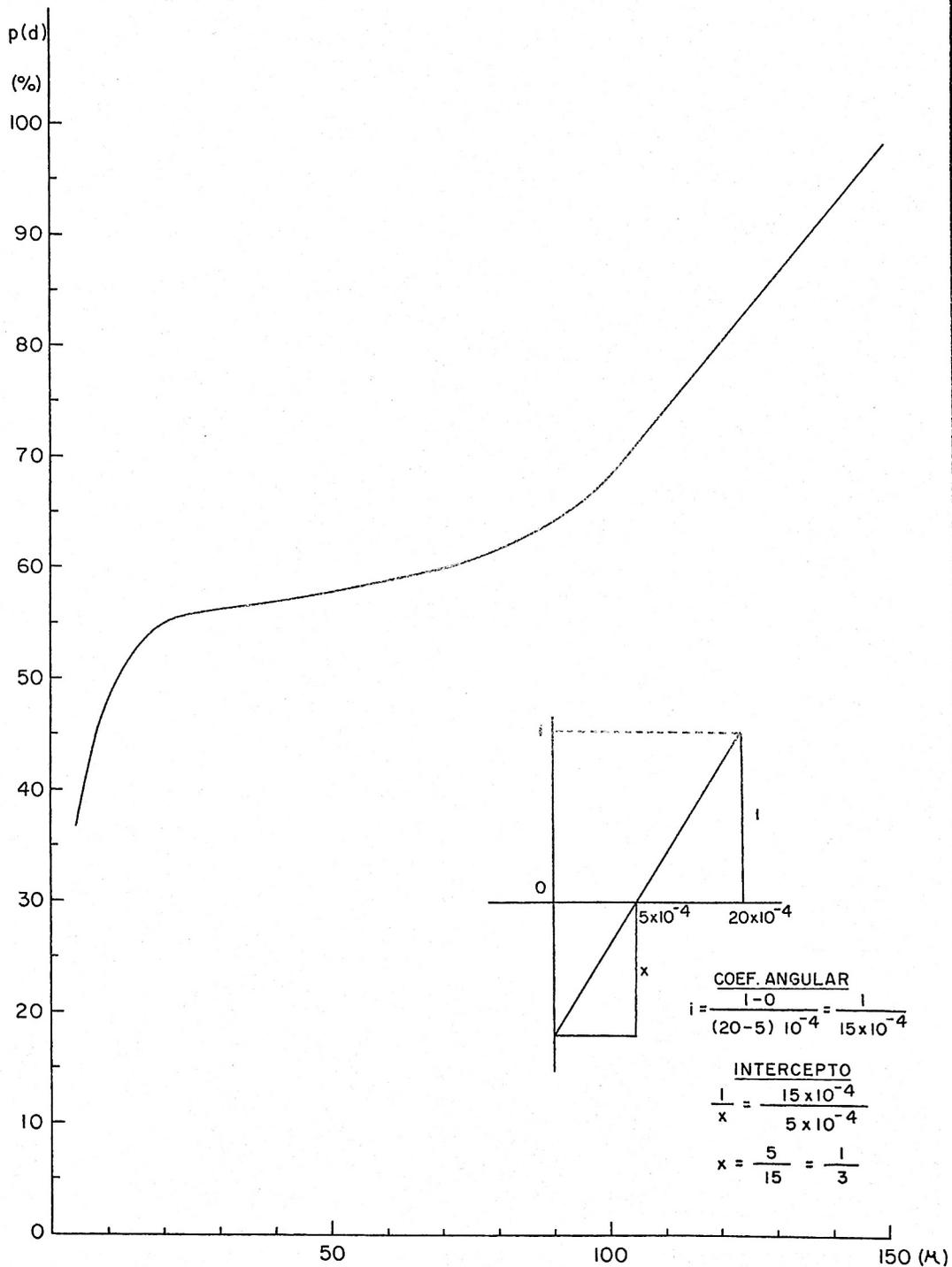


FIG. 1. APX - CURVA GRANULOMÉTRICA DO MATERIAL INJETADO

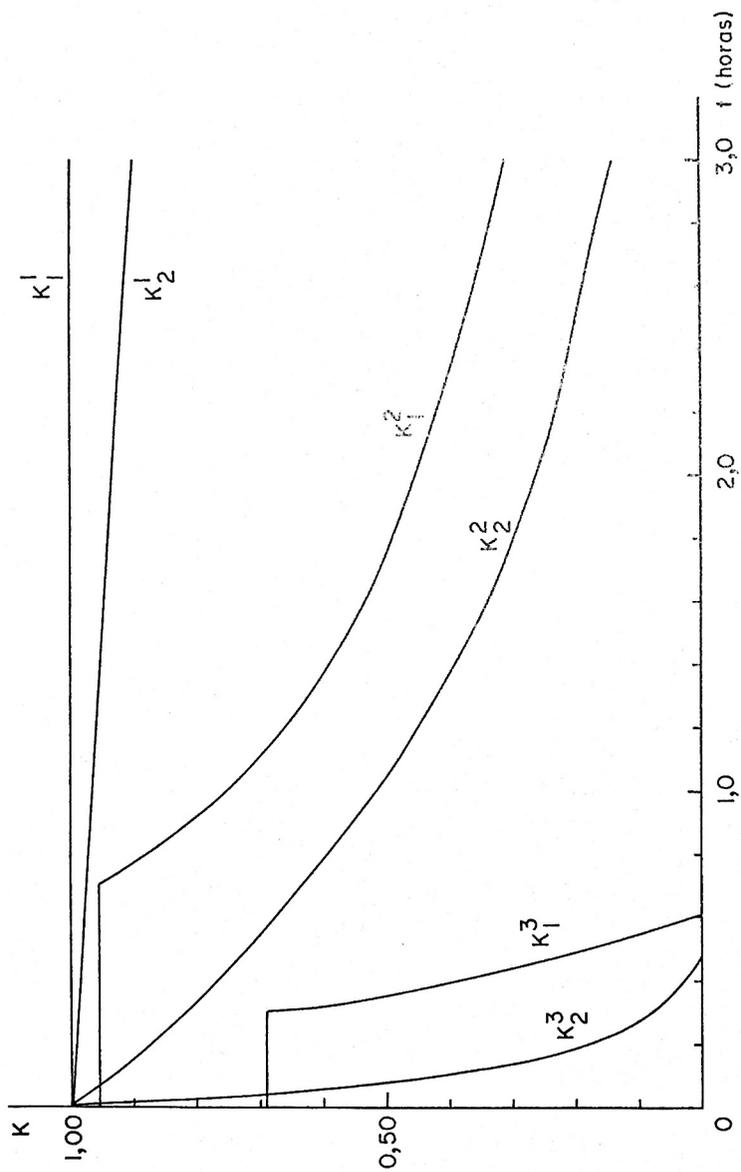
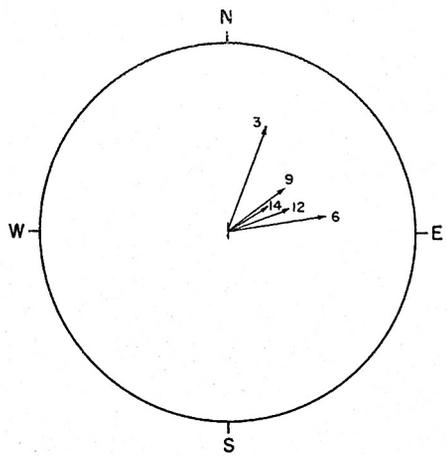
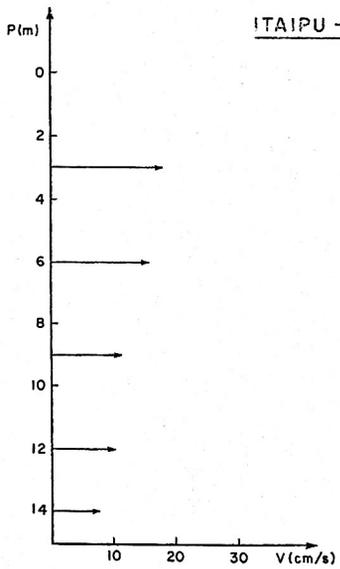
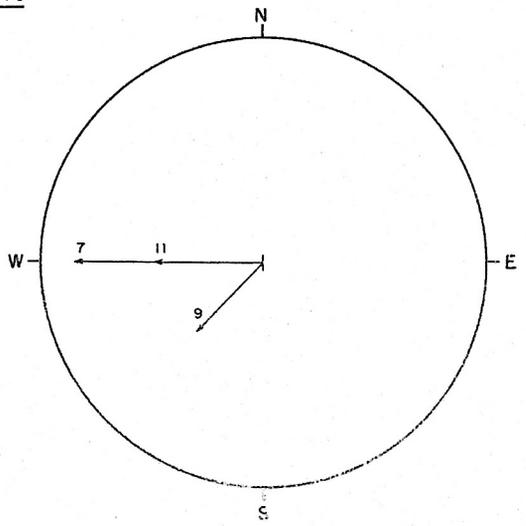
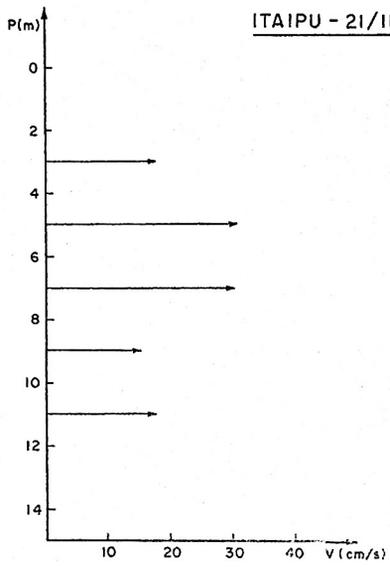


FIG.2. APX - VALORES DE  $K_1$  E  $K_2$   
 $H_0 = 15$  m

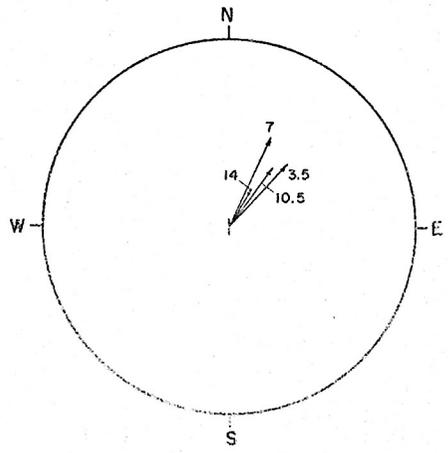
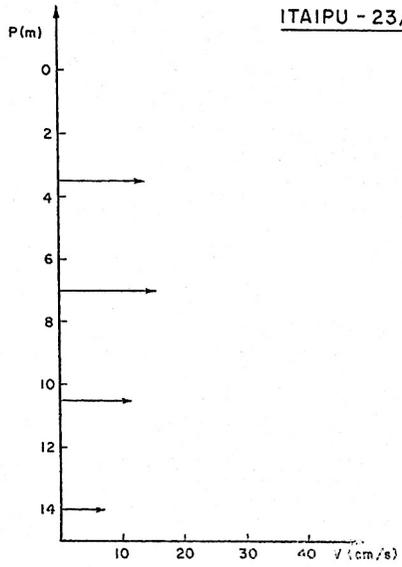
APÊNDICE Nº 2

MEDIÇÕES HIDRÁULICAS EM SANTOS

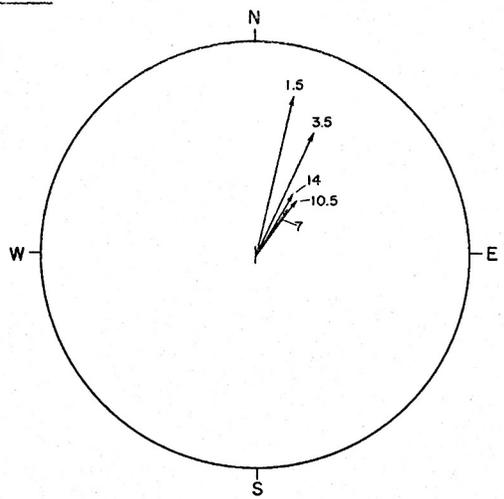
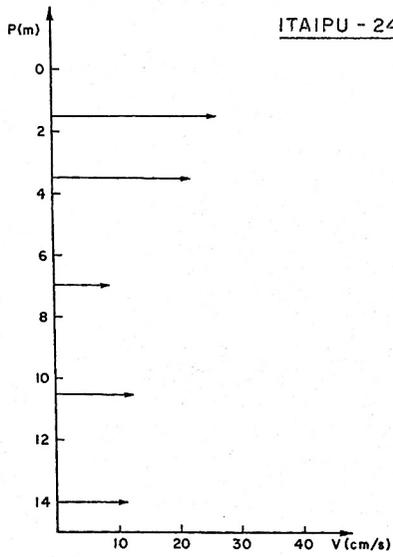
Medições de correntes, a correntômetro, nas áreas de estudo, em Itaipú e Munduba.



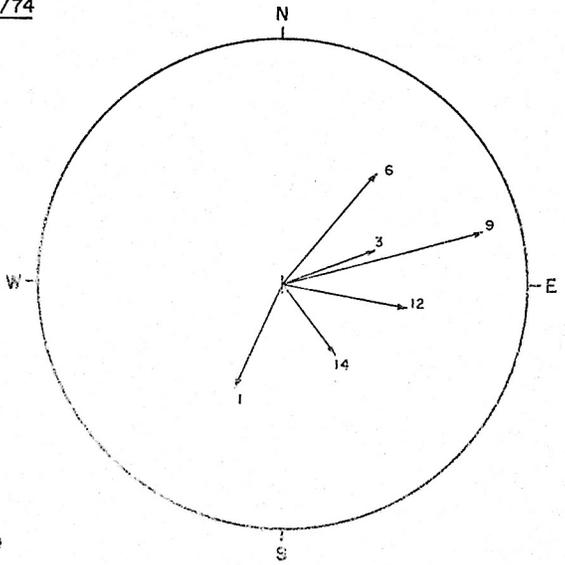
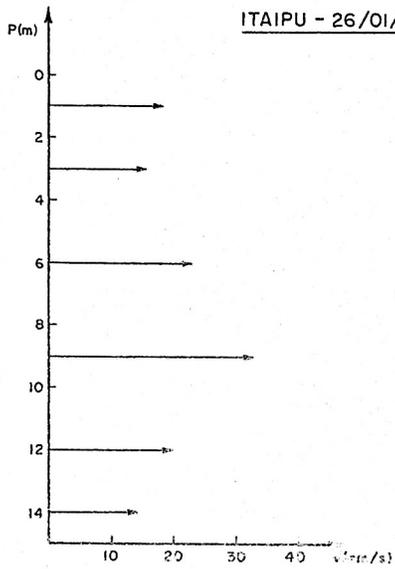
ITAIPU - 23/01/74



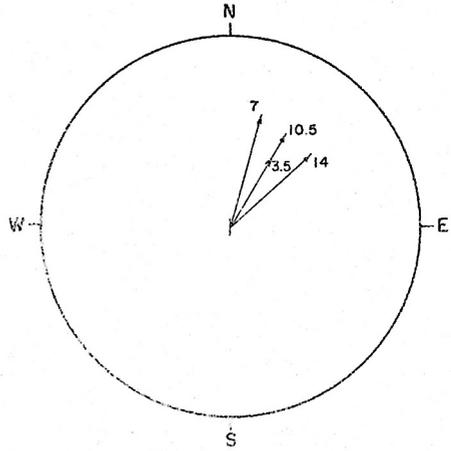
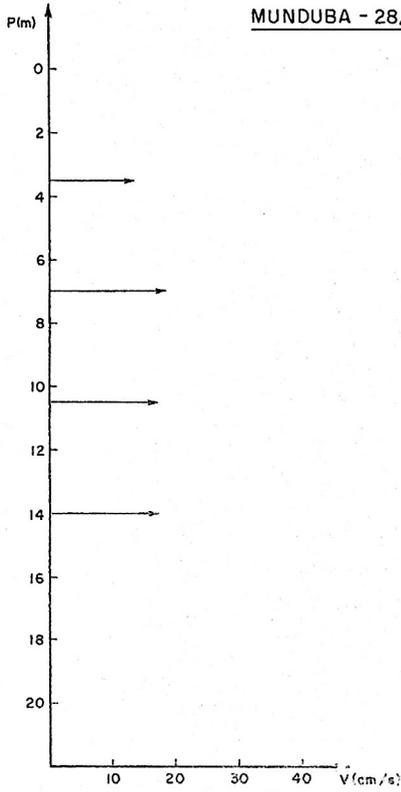
ITAIPU - 24/01/74



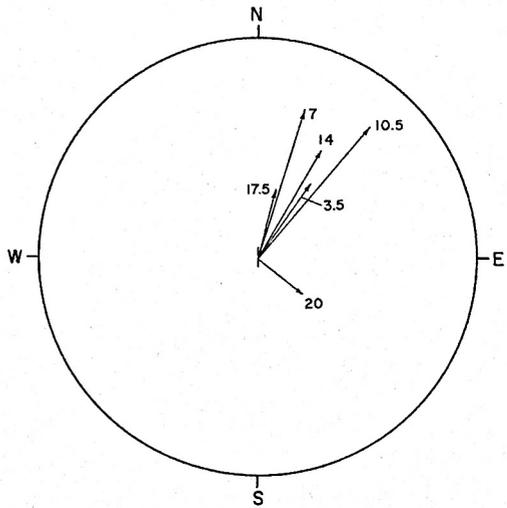
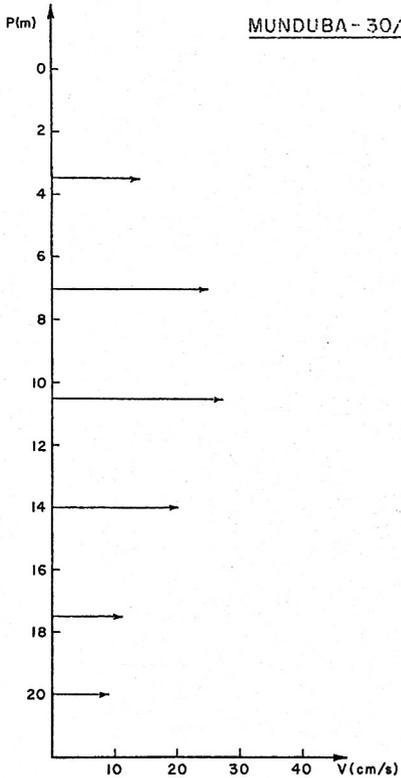
ITAIPU - 26/01/74



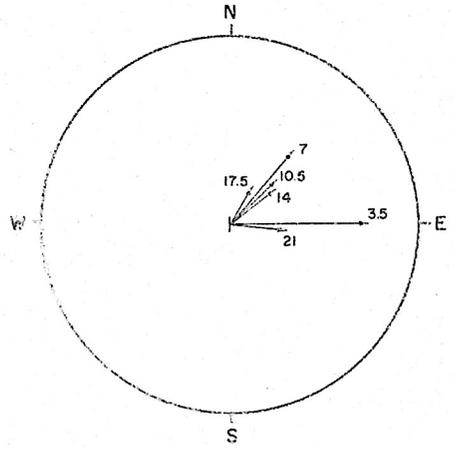
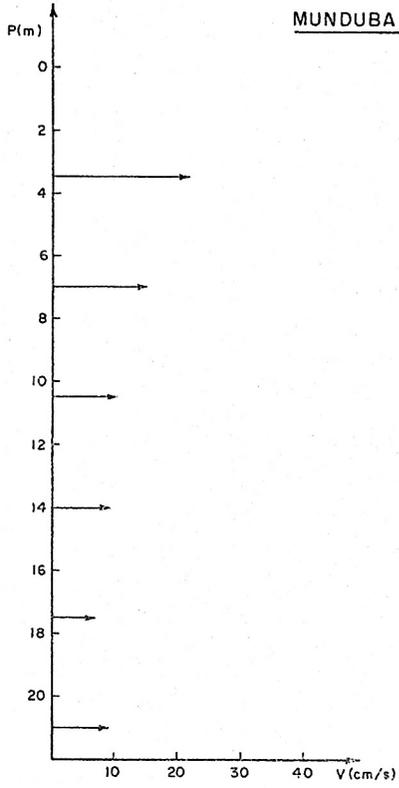
MUNDUBA - 28/01/74



MUNDUBA - 30/01/74



MUNDUBA - 31/01/74



LABORATÓRIO DE RADIOISÓTOPOS  
INSTITUTO DE PESQUISAS RADIOATIVAS

TERCEIRA PARTE

DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTES DE DIFUSÃO NA ÁREA DE  
SANTOS, UTILIZANDO TRAÇADORES RADIOATIVOS.

COMPANHIA BRASILEIRA DE TECNOLOGIA NUCLEAR

INSTITUTO DE PESQUISAS RADIOATIVAS

C.P. 1941 - Belo Horizonte - MG

1973/1974

## RESUMO

Este relatório é a terceira parte do trabalho realizado pelo Laboratório de Radioisótopos do IPR, em colaboração com o Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias, na região de Santos. Nele são apresentados os resultados de duas medidas de características de dispersão turbulenta, realizadas nas regiões em estudo, ao largo das Pontas de Itaipú e Munduba, respectivamente.

O traçador utilizado foi o Bromo-82, acompanhado por dois detectores de cintilação, a 1m e a 4m de profundidade, transportados por um barco.

O relatório apresenta um resumo dos principais modelos de dispersão e a metodologia seguida para a determinação de seus parâmetros. Verificou-se que a dispersão na região de Itaipú tem características de fenômeno bidimensional, em larga escala, que pode ser representado por uma equação do tipo Fick. A nuvem radioativa moveu-se para oeste, como resultado do forte vento leste reinante. A velocidade média da nuvem era de 0,33 m/s. Calculou-se também a diluição resultante do processo de dispersão, estimada em

$$\frac{14,8 x_1^{1/2}}{Q_0},$$

sendo  $x_1$  a distância do ponto de injeção ao ponto considerado, sobre o eixo da nuvem e  $Q_0$ , a descarga de vasa, suposta contínua.

Na região do Munduba, o fenômeno de dispersão a apresenta características bidimensionais, em pequena esca la, o que indica a utilização de um modelo tipo Okubo - Pritchard. A nuvem moveu-se para leste, de acordo com o vento e as correntes reinantes, com uma velocidade média de 0,39 m/s. A diluição resultante foi estimada em

$$S_m = \frac{0,091 x_1}{Q_o} ,$$

Ressalta-se, finalmente, que estes valores são a penas indicativos de ordens de grandeza, pois a medida des tes parâmetros deve cobrir as condições típicas de área, determinadas por exame de medidas hidráulicas de longa du ração.

## Í N D I C E

### TÍTULO.

1.	INTRODUÇÃO.	pag.	1
2.	A TÉCNICA EXPERIMENTAL.		
	2.1. A Injeção.	pag.	3
	2.2. As Detecções.	pag.	3
	2.3. O Tratamento Padrão.	pag.	5
3.	O TRABALHO NA PONTA DE ITAIPÚ.		
	3.1. Descrição da Experiência.	pag.	11
	3.2. A Análise dos Resultados.	pag.	12
	3.3. Cálculo da Diluição.	pag.	17
4.	O TRABALHO NA PONTA DO MUNDUBA.		
	4.1. Descrição da Experiência.	pag.	27
	4.2. Análise dos Resultados.	pag.	27
	4.3. Cálculo da Diluição.	pag.	32
5.	CONCLUSÕES PRELIMINARES	pag.	35

### APENDICE 1.

MODELOS DE DIFUSÃO TURBULENTA.

FIGURA 11 - Taxa de contagem versus área - Nuvem B.

FIGURA 12 - Taxa de contagem versus área - Nuvem C.

FIGURA 13 - Maior contagem em cada nuvem versus tem  
po entre contagens máximas.

FIGURA 14 - Variância versus tempo.

## LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 - Curvas de isocontagem - Levantamento A, dia 26/01/74.
- FIGURA 2 - Curvas de isocontagem - Levantamento B, dia 26/01/74.
- FIGURA 3 - Curvas de isocontagem - Levantamento C, dia 26/01/74.
- FIGURA 4 - Evolução das curvas de isocontagem com o tempo, dia 26/01/74.
- FIGURA 5 - Taxa de contagem versus área das curvas de isocontagem.
- FIGURA 6 - Maior contagem em cada nuvem versus tempo entre contagens máximas.
- FIGURA 7 - Variância versus tempo.
- FIGURA 8 - Curvas de isocontagem - Levantamento B, dia 31/01/74.
- FIGURA 9 - Curvas de isocontagem - Levantamento C, dia 31/01/74.
- FIGURA 10 - Evolução das curvas de isocontagem com o tempo, dia 31/01/74.

DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTES DE DIFUSÃO NA ÁREA DE  
SANTOS, UTILIZANDO TRAÇADORES RADIOATIVOS.

1. INTRODUÇÃO.

O Laboratório de Radioisótopos (LRI) do Instituto de Pesquisas Radioativas realizou uma série de medidas na região do estuário de Santos, em colaboração com o Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH) do Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis (DNPVN). Nestes estudos participa também o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Este trabalho estuda duas novas áreas de despejo para o material dragado da região do Porto.

O presente relatório mostra os resultados de medidas de coeficiente de difusão, realizadas ao largo das Pontas de Itaipú e Munduba, nas áreas definidas em relatórios anteriores. A finalidade destas medidas, que não estavam previstas no esquema original de trabalho, é fornecer informações que auxiliem a interpretação do comportamento do material dragado, após sua descarga no mar, em suspensão.

É indispensável notar que a determinação dos coeficientes de difusão para a região só pode ser feita com precisão após uma longa série de medidas com traçadores, cobrindo os períodos mais representativos das condições hidráulicas reinantes no local. A determinação das

configurações hidráulicas típicas está ligada à realização de medidas de corrente, salinidade, temperatura e ventos durante períodos longos. Portanto, este trabalho visa apenas determinar a ordem de grandeza dos coeficientes de difusão. Estes valores serão utilizados no tratamento dos dados obtidos nas medidas da movimentação do sedimento em suspensão.

## 2. A TÉCNICA EXPERIMENTAL.

### 2.1. A INJEÇÃO.

O trabalho com traçadores consiste na injeção de alguns litros de água da região, marcada com um traçador radioativo, seguida do acompanhamento de sua dispersão por meio de detectores de radiação.

O traçador utilizado foi o Br-82 (meia vida = 35,5 horas), irradiado em pastilhas, sob a forma de brometo de amônia. A preparação da injeção é feita simplesmente retirando-se as pastilhas da blindagem de transporte e procedendo-se à sua dissolução em cerca de 2,5 litros de água do mar.

Após a coleta de alíquotas para posterior calibração de atividade, a mistura é lançada instantaneamente ao mar. A sua posição inicial é marcada pela injeção simultânea de um corante (rhodamina ou fluoresceína), que facilita o acompanhamento posterior da nuvem radioativa.

Antes da injeção, foram realizadas medidas de corrente, de salinidade, de temperatura e de condutividade.

### 2.2. AS DETECÇÕES.

A evolução desta é acompanhada por detectores suspensos de um barco, às profundidades de 1m e 4m. A nuvem é coberta por trajetórias paralelas, normalmente em

direção contrária à direção da corrente. Procura-se realizar tantas coberturas completas da nuvem quantas forem permitidas pelo grau de diluição atingido ou pela possibilidade de posicionamento do barco.

No caso presente, o posicionamento foi executado por meio de uma rede de teodolitos, localizados nas mesmas bases citadas nos relatórios anteriores. O posicionamento era feito de 30 em 30 segundos e a comunicação barco-teodolitos era assegurada por rádio - transmissores portáteis.

As detecções foram feitas com detectores de cintilação portáteis SRAT, tipo SPP-3, acoplados a registradores Hewlett Packard 7100 BM.

A coleta de dados digitais utilizou um contador de impulsos Hewlett Packard 5201 L e uma impressora Hewlett Packard 562 A. O conjunto é alimentado por um gerador a gasolina Honda.

A análise dos dados é feita para cada nuvem inteiramente coberta, a qual representa uma configuração da mistura água-traçador em um instante determinado.

Ela é iniciada pela determinação completa da trajetória do barco durante o rastreamento da nuvem. Quando a detecção está em andamento, a nuvem continua sendo arrastada pela corrente; deste modo, para obter-se a sua forma real, é necessário plotar novamente o curso do barco, levando-se em conta a velocidade da corrente. Determina-se inicialmente o ponto médio da nuvem e o instante que lhe corresponde. Cada ponto da plotagem é deslocado de uma distância igual ao produto da velocidade da cor

rente pelo intervalo de tempo igual à diferença entre o instante que corresponde ao ponto e o instante médio. A direção da correção é, evidentemente, a direção da corrente.

Obtem-se, deste modo, uma visão da nuvem referida ao instante médio da cobertura da nuvem. Outras correções compensam o decaimento radioativo e o ruído de fundo natural da região e já foram descritas em relatórios anteriores.

De posse dos pontos e das contagens corrigidas, pode-se traçar as curvas de iso-contagem, unindo-se, por uma linha contínua, os pontos de mesma contagem..

A análise destas curvas permite definir-se o modelo matemático a ser utilizado e a determinação dos parâmetros deste modelo.

### 2.3. O TRATAMENTO PADRÃO.

A seleção do modelo a ser utilizado e a determinação dos valores de seus parâmetros é feita pela aplicação de um método de tratamento de dados de caráter geral, conhecido como tratamento padrão. Algumas considerações sobre os tipos de modelo de aplicação mais comum são apresentadas no Apêndice 1. Os modelos apresentados baseiam-se na hipótese de que as distribuições de concentração são caracterizadas por uma função de densidade de probabilidade gaussiana. Deve-se verificar se os dados experimentais confirmam esta hipótese.

Para exemplificar o tratamento dos dados, apliquemos o tratamento padrão ao modelo de Fick, bi-dimensional, que tem a forma:

$$C(x,y,t) = \frac{M}{4\pi H(D_x D_y)^{\frac{1}{2}} t} \exp - \left[ \frac{x^2}{4D_x t} + \frac{y^2}{4D_y t} \right] \quad (2.3.1)$$

Façamos,

$$C_o = \frac{M}{4\pi H(D_x D_y)^{\frac{1}{2}} t} \quad (2.3.2)$$

Levando este valor na expressão (2.3.1) e tomando-se os logarítmos naturais dos dois membros, obtem-se:

$$\ln \frac{C}{C_o} = \frac{x^2}{4D_x t} + \frac{y^2}{4D_y t} \quad \text{ou}$$

$$\frac{x^2}{4D_x t \ln \frac{C}{C_o}} + \frac{y^2}{4D_y t \ln \frac{C}{C_o}} = 1 \quad (2.3.3)$$

que é a equação de uma elipse. Os seus semi-eixos são:

$$a_1 = (4D_x t \ln \frac{C}{C_0})^{\frac{1}{2}} \quad e \quad \cdot$$

$$a_2 = (4D_y t \ln \frac{C}{C_0})^{\frac{1}{2}}$$
(2.3.4)

A área da elipse é dada por:

$$A = \pi a_1 a_2$$

ou seja,

$$A = 4\pi t \ln \frac{C}{C_0} (D_x D_y)^{\frac{1}{2}} \quad \dots$$

$$\ln C = - \frac{1}{4\pi t (D_x D_y)^{\frac{1}{2}}} A + \ln C_0 \quad (2.3.5)$$

Se construirmos um gráfico tendo como variáveis  $\ln C$  e  $A$ , deveremos obter uma reta, cuja inclinação é:

$$m = \frac{-1}{4\pi t (D_x D_y)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.3.6)$$

Este gráfico constitui a primeira parte do tratamento padrão. Verificou-se que, para um modelo gaussiano, o grã

fico de  $\ln C$  versus  $A$  deve ser uma reta. Se os valores experimentais satisfizerem estas condições, um modelo gaussiano, tais como os citados no Apêndice 1, é aplicável. Na prática, os pontos experimentais apresentam sempre um espalhamento que dificulta a interpretação do gráfico.

O segundo gráfico do tratamento padrão indica se devemos utilizar um modelo em duas ou três dimensões. Na expressão 2.3.2, façamos:

$$N = \frac{M}{4\pi H(D_x D_y)^{\frac{1}{2}}}$$

Então,

$$C_o = \frac{N}{t}$$

Tomando os logaritmos naturais dos dois membros, obtém-se

$$\ln C_o = - \ln t + \ln N \quad (2.3.7)$$

Portanto, um gráfico  $\ln C_o$  versus  $\ln t$  deve ser uma reta, com inclinação  $-1$ , se o modelo a ser utilizado é bi-dimensional. Para o caso do modelo de Fick tridimensional, a aplicação do mesmo método daria uma reta com inclinação  $-\frac{3}{2}$ . É útil observar que os outros modelos citados no

apêndice 1 - Obukhov e Okubo-Pritchard - são também modelos que estudam o fenômeno da dispersão apenas em duas dimensões.

O terceiro gráfico do tratamento padrão é utilizado para verificar a escala do fenomeno. Vimos no Apêndice 1 que cada um dos modelos é aplicável a uma escala do fenomeno da turbulencia. O modelo agora analisado apresenta a propriedade:

$$\sigma^2 = 2Kt \quad (2.3.8)$$

Tornando-se os logarítmos naturais, obtem-se:

$$\ln \sigma^2 = \ln t + \ln 2K$$

Um gráfico de  $\ln \sigma^2$  versus  $\ln t$  deve, neste caso, fornecer uma reta com inclinação igual a 1.

Como, para o modelo de Okubo-Pritchard temos:

$$\sigma^2 \approx w^2 t^2 \quad (2.3.9)$$

ele será aplicável se o coeficiente angular da reta for igual a 2, o que indicará um fenomeno em pequena escala.

Finalmente, no modelo de Obukhov, para escala intermediária,

$$\sigma^2 \approx \beta^3 t^3 \quad (2.3.10)$$

a reta obtida no diagrama duplamente logarítmico deverá ter uma inclinação igual a 3.

A aplicação do tratamento padrão permite a seleção do modelo a ser utilizado. A determinação dos parâmetros do modelo será vista na análise dos dados experimentais.

### 3. O TRABALHO NA PONTA DE ITAIPU.

#### 3.1. DESCRIÇÃO DA EXPERIÊNCIA.

A medida de coeficientes de difusão turbulenta na região de dragagem proposta para o largo da Ponta de Itaipu foi realizada em 26 de janeiro de 1974.

O traçador utilizado foi o Br-82, sob a forma de brometo de amônia, em uma atividade de cerca de 770 mCi.

A preparação do traçador consistiu em dissolve-lo em 2,5 litros de água do mar, derramando-se a mistura pela borda do barco, por meio de pinças de manuseio. Antes da injeção, foi coletada uma amostra da solução, para posterior calibração de atividade.

A injeção foi realizada às 13 horas e 50 minutos, em mar calmo. A onda era leste, soprando uma brisa leve SSE. Logo em seguida, o vento passou a soprar de leste, refrescando no decorrer da tarde.

O retorno da experiência foi feito, inclusive, sob forte temporal, vindo de leste.

Antes da injeção, foram realizadas medidas de corrente, salinidade e temperatura.

A detecção iniciou-se aproximadamente às 14 horas, utilizando-se duas sondas. A sonda número 9 estava a 1m da superfície e a sonda 10 foi colocada à profundidade de 4m.

Foram realizadas três coberturas completas da nuvem radioativa; a 4<sup>a</sup> passagem foi interrompida porque uma das bases de teodolito ficou oculta pela Ponta de Itaipú. A nuvem de corante, injetada simultaneamente com o traçador, permaneceu visível até o final do trabalho.

### 3.2. A ANÁLISE DOS RESULTADOS.

Os dados foram analisados de acordo com o processo citado anteriormente; as curvas de isoconcentração obtidas são apresentadas nas figuras 1, 2 e 3. A figura 4 apresenta o conjunto das três curvas situado em relação à Ponta de Itaipú. Elas correspondem aos dados obtidos pela sonda à profundidade de 1m.

Na figura 4, aparecem também os diagramas referentes às medidas de corrente, salinidade e temperatura. Pode-se observar que a corrente, entre 3m e 9m, era dirigida para NE, mudando para o quadrante SE a partir de 9m. Como o movimento das curvas se fez para o oeste, a corrente superficial presente é claramente devida ao vento E que soprava durante o trabalho e às ondas E reinantes.

As duas primeiras nuvens tem formas bastante regulares, tendo a nuvem A o comprimento de 320m e a largura de 160m. A nuvem B alongou-se bastante, mantendo-se estreita; seu comprimento era de 900m, para uma largura de 100m. A nuvem C, mais deformada, tem cerca de 1100m de comprimento e 250m de largura. A sonda a 4m de profundidade praticamente não foi utilizada, pois a direção da corrente, a 4m, era diferente da direção à superfície.

Apenas em uma passagem, quando o barco afastou-se bastante da nuvem superficial, foi possível observar atividade a 4m de profundidade.

A salinidade e a temperatura variaram bastante com a profundidade, sendo possível a existência de estratificação por diferenças de densidade neste dia.

A tabela 1 apresenta o levantamento das áreas de cada curva de isocontagens, para as três nuvens detectadas. Na mesma tabela, constam os parâmetros da melhor reta que passa pelos pontos experimentais, apresentados na figura 5.

O ajuste de reta é feito pelo método dos mínimos quadrados. Ela apresenta o gráfico de  $\ln C$  versus  $A$ , discutido no tratamento padrão. Apesar da dispersão dos pontos experimentais, pode-se dizer que o fenômeno de dispersão estudado segue uma lei de densidade de probabilidade gaussiana.

A partir da figura 5, obtem-se as contagens máximas de cada nuvem, extrapolando-se o valor da contagem para um tempo  $t = 0$ . Os resultados são apresentados na tabela 2 e na figura 6, que mostra também a melhor reta que passa pelos pontos experimentais. Verifica-se que o coeficiente angular da reta é  $-1,16$ , o que indica a utilização de um modelo tipo Fick, bidimensional.

Durante a análise do tratamento padrão, mostrou-se que o coeficiente angular da reta  $\ln C$  versus área (figura 5) era:

$$m = - \frac{1}{4\pi t (D_x D_y)^{\frac{1}{2}}}$$

Ora, para um modelo tipo Fick, tem-se

$$\sigma^2 = 2Kt, \text{ com } K = (D_x D_y)^{\frac{1}{2}}$$

Portanto, combinando as duas expressões, obtém-se

$$\sigma^2 = - \frac{1}{2\pi m} \quad (3.2.1)$$

Estes dados, obtidos na tabela 1, são reapresentados na tabela 3, que inclui também o tempo decorrido entre os pontos de contagem máxima de cada nuvem.

O gráfico de  $\ln\sigma^2$  versus  $\ln t$  é apresentado na figura 7; a melhor reta que passa pelos pontos experimentais tem um coeficiente angular igual a 0,601. Conforme a discussão apresentada no tratamento padrão, este valor, da ordem de 1, indica um fenômeno em grande escala, o que confirma a utilização do modelo de Fick.

Portanto, no caso de uma injeção de traçador radioativo na área ao largo da Ponta de Itaipú, pode ser aplicado o modelo bidimensional de Fick.

$$C(x,y,t) = \frac{M}{4\pi H (D_x D_y)^{\frac{1}{2}}} \exp - \left[ \frac{(x-Ut)^2}{4D_x t} + \frac{(y-Vt)^2}{4D_y t} \right] \quad (3.2.2)$$

Deve-se determinar agora os parâmetros do modelo, ou seja, os coeficientes de difusão  $D_x$  e  $D_y$ . Para isso, utilizaremos as expressões (2.3.4), dividindo-as membro a membro. Obtem-se:

$$\frac{a_1}{a_2} = \left( \frac{D_x}{D_y} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.2.3)$$

O valor de  $a_1$  é obtido diretamente das curvas de isocontagem, estimando o raio médio de uma elipse ajustada à curva. A área da curva escolhida é medida a planímetro. Da expressão:

$$A = \pi a_1 a_2 \quad ,$$

obtem-se o valor de  $a_2$ .

A expressão 2.3.6 forma a outra equação para determinar-se  $D_x$  e  $D_y$ . Combinando-a com a expressão (3.1.3) obtem-se:

$$D_x = - \frac{1}{4\pi mt} \frac{a_1}{a_2} \quad (3.2.4)$$

$$D_y = - \frac{1}{4\pi mt} \frac{a_2}{a_1}$$

O valor de  $m$  foi determinado anteriormente, a partir dos dados da tabela 1. O cálculo dos coeficientes de difusão é apresentado na tabela 4. Os seus valores médios são:

$$D_x = 0,62 \text{ m}^2/\text{s} \quad (3.2.5)$$

$$D_y = 0,27 \text{ m}^2/\text{s}$$

Pode-se agora obter a concentração em um ponto qualquer da região estudada aplicando-se a expressão (3.2.2), na qual todos os parâmetros são conhecidos.

### 3.3. CÁLCULO DA DILUIÇÃO.

A partir dos dados experimentais, procura-se a gora obter a distribuição de concentração a uma determinada distancia do ponto de descarga. Ela é calculada a partir de modelos para descarga continua de poluente, obtida pela superposição de um número infinito de nuvens gaussianas superpostas. Para que seja possível supor-se uma distribuição de concentração gaussiana em uma secção qualquer perpendicular à direção do fluxo, é necessário que certas hipóteses sejam satisfeitas:

- i. A distribuição espacial de velocidades é continua e uniforme.
- ii. A injeção do material é concentrada em um ponto .
- iii. A turbulencia é homogenea.

Neste caso, a distribuição normal pode representar a distribuição de concentrações em uma secção perpendicular à direção do movimento:

$$C(x_1, x_2, x_3) = C(x_1, 0, 0) \cdot \exp. - \left( \frac{x_2^2}{2\sigma_2^2} + \frac{x_3^2}{2\sigma_3^2} \right) \quad (3.3.1)$$

A constante  $\tilde{e}$  é determinada pela aplicação do princípio da continuidade

$$C_0 Q_0 dt = U_1 dt \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} C(x_1, x_2, x_3) dx_2 dx_3 \quad (3.3.2)$$

sendo  $C_0$  a concentração inicial

$Q_0$  a taxa de descarga do material

$U_1$  a velocidade na direção do fluxo

Obtem-se, por integração,

$$C(x_1, 0, 0) = \frac{C_0 Q_0}{2\pi\sigma_2\sigma_3 U_1} \quad (3.3.3)$$

No caso de ser possível desprezar a difusão vertical a equação fica

$$C(x_1, x_2) = C(x_1, 0) \exp\left(-\frac{x_2^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad (3.3.4)$$

A determinação da constante  $\tilde{e}$  é feita pela aplicação do princípio da continuidade (massa injetada = massa que sofre dispersão)

$$C_0 Q_0 dt = \delta dx_1 \int_{-\infty}^{+\infty} C(x_1, x_2) dx_2, \quad (3.3.5)$$

sendo  $\delta$  a espessura na qual se distribui o material.  
Obtem-se:

$$C(x_1, 0) = \frac{C_0 Q_0}{2\pi \sigma_2 U_1 \delta} \quad (3.3.6)$$

Adotaremos esta última hipótese no caso em estudo. A velocidade da nuvem é estimada pela distância entre os pontos de atividade máxima dividida pelo intervalo de tempo decorrido entre os dois máximos. Encontra-se um valor médio de

$$U_1 = 0,33 \text{ m/s.}$$

Em nosso modelo,

$$\sigma^2 = 2Kt$$

como

$$U_1 = \frac{x_1}{t},$$

tem-se

$$\sigma^2 = \frac{2K x_1}{U_1}$$

Os valores de  $K$  são obtidos da tabela 4. Utiliza-se, no cálculo, a propriedade

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 ,$$

que, no caso de simetria rotacional, transforma-se em

$$\sigma^2 = 2\sigma_1^2 = 2\sigma_2^2$$

TABELA 5

K	$\sigma^2 = \frac{2K}{U_1} x_1$	$\sigma_2^2$	$\sigma^2$
0,56	3,39 $x_1$	1,695 $x_1$	1,30 $x_1^{1/2}$
0,20	1,21 $x_1$	0,606 $x_1$	0,78 $x_1^{1/2}$
0,39	2,36 $x_1$	1,18 $x_1$	1,09 $x_1^{1/2}$

Para obtermos a concentração no eixo da nuvem, combinamos as expressões (3.3.1) e (3.3.6), fazendo  $x_1 = x_2 = 0$

$$C(0,t) = \frac{C_o Q_o}{2\pi \sigma_2 \delta U_1} \quad (3.3.7)$$

Adotando um valor médio para  $\sigma_2 = 1,05$  e supondo que a atividade está distribuída em toda a profundidade, obtem-se

$$\begin{aligned} C(0,t) &= \frac{C_o Q_o}{2\pi \times 1,05 \times 17 \times 0,33 x_1^{1/2}} = \\ &= \frac{C_o Q_o}{14,8 x_1^{1/2}} \end{aligned}$$

A diluição no eixo da nuvem é a relação entre a concentração inicial e a concentração no instante considerado

$$S_m = \frac{C_o}{C(0,t)} = \frac{14,8 x_1^{1/2}}{Q_o} \quad (3.3.8)$$

Tentemos estabelecer limites para a diluição , fazendo hipóteses sobre a variação dos parâmetros envolvidos em (3.3.7).

Suponhamos que,

$$0,5 \text{ m}^2 < \sigma^2 < 3 \text{ m}^2$$

$$5 \text{ m} < \delta < 17 \text{ m}$$

$$0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} < U_1 < 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Então,

$$\frac{C_o Q_o}{0,62 x_1^{1/2}} < C(0,t) < \frac{C_o Q_o}{63,4 x_1^{1/2}} \quad (3.3.9)$$

ou

$$\frac{0,62 x_1^{1/2}}{Q_o} < S_m < \frac{63,4 x_1^{1/2}}{Q_o} \quad (3.3.10)$$

É evidente que os parâmetros acima devem ser determinados em função das estatísticas anuais de camadas estratificadas e de velocidades. Os valores aqui apresentados são apenas ordens de grandeza.

A descarga de material dragado é descontínua. Supondo-se que ela possa ser simulada por uma descarga contínua de  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , o que corresponde à descarga de 4 batelões de  $500 \text{ m}^3$  por hora, a diluição provável seria dada pela expressão (3.3.8).

$$S_m = \frac{14,8 \times x_1^{1/2}}{0,5}$$

Para uma distancia de 3000 m do ponto de descarga, a diluição seria de 1620 vezes.

O valor máximo da diluição seria de 6900 e o mínimo de 68 vezes, no eixo da nuvem.

TABELA 1

Nuvem A		Nuvem B		Nuvem C	
Iso- contagem	Área -	Iso- contagem	Área	Iso- contagem	Área
$\frac{\text{contagem}}{\text{minuto}}$	(m <sup>2</sup> )	$\frac{\text{contagem}}{\text{minuto}}$	(m <sup>2</sup> )	$\frac{\text{contagem}}{\text{minuto}}$	(m <sup>2</sup> )
337900	280	67580	2880	38860	1600
168960	4000	38860	5920	23650	3200
67580	18100	23650	9760	13520	6400
38860	25500	13520	24600	5070	26900
23650	32200	5070	38720	1690	106200
13520	36100	1690	51080	170	151200
5070	40200	170	77680		
1690	46800				

AJUSTE DA RETA  
 $\ln C = - mA + \ln C_o$

m	$\ln C_o$	m	$\ln C_o$	m	$\ln C_o$
-0,00010	12,838	-0,00008	11,163	-0,00003	10,038

TABELA 2

## CONTAGEM MÁXIMA VERSUS TEMPO ENTRE MÁXIMOS

Nuvem	Pico (c/min.)	t (s)
A	358000	1410
B	84500	4920
C	56800	6810

Ajuste da Reta  $mC_0$  versus  $\ln t$

coef. angular = - 1,165

intercepto = 21,24

c. correlação = 1,000

TABELA 3

$$\text{CÁLCULO DE } \sigma^2 = - \frac{1}{2\pi m}$$

Nuvem	m	$\sigma^2$	t
A	0,00010	1591	1410
B	0,00008	1989	4920
C	0,00003	5305	6810

Ajuste da Reta  $m\sigma^2$  versus  $\ln t$

coef. angular = 0,601

intercepto = 2,920

c. correlação = 0,78

TABELA 4

CÁLCULO DOS COEFICIENTES DE DIFUSÃO ( $D_x$  e  $D_y$ )

Nuvem	m	A(m <sup>2</sup> )	a <sub>1</sub> (m)	a <sub>2</sub> (m)	a <sub>1</sub> /a <sub>2</sub>	a <sub>2</sub> /a <sub>1</sub>
A	0,00010	46800	164,00	90,8	1,816	0,55
B	0,00008	41080	193,00	84,2	2,29	0,44
C	0,00003	106200	180,0	187,8	0,96	1,04

$$A = \pi a_1 a_2 \qquad a_2 = \frac{A}{a_1 \pi}$$

$$D_x = - \frac{1}{4\pi m t} \frac{a_1}{a_2} \qquad D_y = - \frac{1}{4\pi m t} \frac{a_2}{a_1}$$

Nuvem	t (s)	$-\frac{1}{4\pi m t}$	$D_x$ (m <sup>2</sup> /s)	$D_y$ (m <sup>2</sup> /s)	$K(D_x D_y)^{\frac{1}{2}}$	$\sigma^2 = 2kt$
A	1410	0,56	1,02	0,31	0,56	1579
B	4920	0,20	0,46	0,09	0,20	1970
C	6810	0,39	0,37	0,41	0,39	5310
			0,62	0,27		

#### 4. O TRABALHO NA PONTA DO MUNDUBA.

##### 4.1. DESCRIÇÃO DA EXPERIÊNCIA.

A medida das características de dispersão turbulenta na região de dragagem proposta para o largo da Ponta do Munduba foi iniciada às onze horas do dia 31 de janeiro de 1974. O traçador utilizado foi ainda o Br-82, sob a forma de brometo de amonia, com uma atividade de cerca de 1 Ci. A técnica de injeção adotada foi descrita no paragrafo 3.1.

As condições reinantes eram de mar calmo, com onda S de 0,7 m a 1 m de amplitude e período entre 5 e 7 segundos. O vento reinante era W.SW, fraco. Antes da injeção, foram realizadas medidas de salinidade, velocidade e direção de corrente, temperatura e condutividade, em diuversas profundidades.

Foram realizadas três coberturas completas da nuvem radioativa; mais uma vez, a detecção foi interrompida por falta de visibilidade das bases de teodolitos.

A primeira detecção foi abandonada, por conter um número muito pequeno de pontos, devido à pequena dispersão sofrida até então pela nuvem radioativa.

##### 4.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS.

Os dados experimentais foram analisados pela aplicação do tratamento padrão. As curvas de isoconcentrações

ção para a sonda a 1 m de profundidade são apresentadas nas figuras 8 e 9. A figura 10 apresenta o conjunto das duas nuvens situado em relação à Ponta do Munduba e à ilha da Moela. Nela aparecem também os dados referentes às medidas de velocidade e direção de corrente, salinidade e temperatura.

A corrente manteve-se sempre entre N e E, o que concorda com o movimento observado das nuvens e com a direção do vento. Ambas tem formas bastante regulares e alongadas; a nuvem C, por exemplo, tem cerca de dois km de comprimento e cerca de 150 m de largura. Este tipo de dispersão ocorreu também no caso da Ponta de Itaipũ.

A salinidade variou fortemente entre 0 e 4 m, enquanto que variações bruscas de temperatura foram observadas entre 10 e 12 metros. É possível, portanto, que o material injetado se tenha mantido na camada superficial menos densa, sem se distribuir até o fundo. Esta hipótese foi adotada no cálculo da diluição, apresentado posteriormente.

Ela é confirmada pela sonda situada a 4 m de profundidade, que só apresentou contagens cerca de três horas após o início do trabalho. Como a direção da corrente a 3,5 m de profundidade era aproximadamente a mesma da direção geral de movimento, a sonda a 4 m mostraria atividade desde o início, se o material não se tivesse mantido próximo à superfície.

A tabela 6 apresenta o levantamento das áreas de cada curva de isocontagens, para as duas nuvens utilizadas nessa análise. Nela constam também os parâmetros da

lhor reta que passa pelos pontos experimentais, a qual é apresentada nas figuras 11 e 12. Nestas figuras, aparecem os gráficos de  $\ln C$  versus  $A$ , discutidos no tratamento padrão. A boa qualidade do ajuste dos pontos experimentais à reta de mínimos quadrados permite dizer que o fenômeno de dispersão estudado segue uma lei de densidade de probabilidade gaussiana.

As contagens máximas de cada nuvem, obtidas pela extrapolação das retas experimentais, são apresentadas na figura 13, em função do tempo, num diagrama duplamente logarítmico. O coeficiente angular da reta obtida é igual a  $-2,28$ , o que indica a utilização do modelo bidimensional em pequena escala, de Okubo-Pritchard.

Neste modelo, fazendo-se:

$$C_0 = \frac{M}{\pi w^2 t^2} ,$$

obtem-se:

$$\frac{C}{C_0} = \exp - \frac{r^2}{2\sigma^2}$$

Multiplicando-se ambos os membros por  $\pi$  e tomando-se os logaritmos naturais, obtem-se:

$$\ln C = - \frac{1}{2\pi\sigma^2} A + \ln C_0$$

A representa a área envolvida pela curva de isocontagem C; esta expressão é, portanto, a reta apresentada nas figuras 11 e 12. O seu coeficiente angular é:

$$m = - \frac{1}{2\pi\sigma^2}$$

logo,

$$\sigma^2 = - \frac{1}{2\pi m} \quad (4.2.1),$$

expressão idêntica a (3.2.1).

O coeficiente angular desta reta permite o cálculo de  $\sigma^2$ .

O gráfico de  $\ln \sigma^2$  versus  $\ln t$  é apresentado na figura 14; a reta que passa pelos pontos experimentais tem um coeficiente angular igual a 1,87, o que confirma a utilização de um modelo de Okubo-Pritchard. Portanto, no caso da injeção de traçador ao largo da Ponta do Munduba, pode ser aplicado o modelo de Okubo-Pritchard

$$C(r, t) = \frac{M}{\pi w^2 t^2} \exp - \frac{r^2}{w^2 t^2} \quad (4.2.2)$$

O parâmetro a ser determinado é a velocidade de difusão  $w$ . Este modelo apresenta a propriedade

$$\sigma^2 = w^2 t^2 \quad (4.3.3)$$

Para a nuvem B,  $\sigma^2 = 1859 \text{ m}^2$  e  $t = 2450$  segundos  
 Para a nuvem C, tem-se  $\sigma^2 = 13100$  e  $t = 6700$  segundos.  
 Introduzindo estes valores em (4.2.3) obtem-se:

$$w_B = 0,017 \text{ m/s}$$

e

$$w_C = 0,016 \text{ m/s}$$

Portanto, a velocidade de difusão a ser utilizada no modelo é:

$$w = 0,017 \text{ m/s} \quad (4.2.4)$$

A sua aplicação na expressão (4.2.2) permite calcular a concentração em um ponto situado a distância  $r$  do ponto de injeção.

## 4.3. CÁLCULO DA DILUIÇÃO.

O método utilizado foi apresentado em (3.3). A expressão a ser calculada é (3.3.6)

$$C(0, t) = \frac{C_o Q_o}{2\pi\sigma^2 \delta U_1}$$

O valor de  $\delta$  - a profundidade na qual se distribui o material injetado - deve ser inferior a 4 m, no caso presente. Este valor resulta das considerações feitas no parágrafo anterior, relativas à provável existência de estratificação, confirmada pelo comportamento da sonda a 4 m de profundidade. Adotaremos  $\delta = 3m$ .

A velocidade da nuvem é calculada dividindo-se a distancia do ponto de maior atividade de cada nuvem ao ponto de injeção pelo tempo decorrido entre a ocorrência do máximo e o instante da injeção. Tem-se, para a nuvem B, uma distancia de 1245m e um tempo de 2450s, enquanto que, para a nuvem C, a distancia é 1954m e o tempo 6970s. A velocidade média resultante é  $U_1 = 0,39$  m/s. O valor de  $\sigma^2$  é calculado a partir da expressão:

$$\sigma^2 = w^2 t^2 \quad ;$$

como  $U_1 = \frac{x}{t}$ , tem-se:

$$\sigma^2 = \frac{w^2 x^2}{U_1^2}$$

Para  $U_1 = 0,39$  m/s e  $w = 0,017$  m/s , tem-se:

$$\sigma^2 = 1,90 \times 10^{-3} x_1^2$$

Para um modelo com simetria rotacional

$$\sigma^2 = 2\sigma_2^2$$

Portanto,

$$\sigma^2 = 0,031 x_1$$

O valor da concentração no eixo da nuvem é obtido levando  $\delta$ ,  $\sigma_2$  e  $U_1$  em (3.3.6):

$$C(0,t) = \frac{C_o Q_o}{0,091 x_1}$$

Portanto, a diluição obtida, no eixo da nuvem, será:

$$S_m = \frac{C_o}{C(0,t)} = \frac{0,091 x_1}{Q_o}$$

Supondo-se para ilustração, uma descarga contínua de vasa de  $0,5$  m<sup>3</sup>/s, a diluição provável, para um pon

to situado a 3000 m do local de despejo, seris:

$$S_m = 6000.$$

Para as condições reinantes nos dias de trabalho, a diluição obtida ao largo da Ponta do Munduba é quase 4 vezes maior que a conseguida na região da Ponta do Itaipũ.

Supondo que os intervalos de variações dos diversos parâmetros que aparecem na fórmula (3.3.6) sejam

$$0,015 \text{ m}^2 < \sigma_2 < 0,062 \text{ m}^2$$

$$0,2 \text{ m/s} < U_1 < 0,6 \text{ m/s}$$

$$2 \text{ m} < \delta < 25 \text{ m},$$

as diluições máximas e mínimas que seriam obtidas estarão entre 14.000 e 90 vezes, para um ponto situado a 3.000 m de despejo contínuo de 0,5 m<sup>3</sup>/s de vasa. Como parte da vasa se decanta, aumentando a diluição, estes valores representam uma estimativa das piores condições possíveis para a região. É essencial ressaltar, entretanto, que tais estimativas baseiam-se em uma única experiência e exigiria, para ser precisa, a realização de uma série de trabalhos, acompanhados por medidas de densidade, velocidade e direção de corrente e outros parâmetros hidráulicos relevantes.

## 5. CONCLUSÕES PRELIMINARES.

As medidas de parâmetros de dispersão realizadas em Santos, apresentaram os seguintes resultados:

## i. Ponta de Itaipũ.

Os resultados experimentais indicam a validade de um modelo para grande escala, bidimensional, do tipo Fick. Os coeficientes de difusão encontrados foram

$$D_x = 0,62 \text{ m}^2/\text{s}$$

e

$$D_y = 0,27 \text{ m}^2/\text{s}.$$

A nuvem radioativa movimentou-se para o oeste, com uma velocidade média de 0,33 m/s, impulsionada pelo forte vento E reinante. A diluição obtida em um ponto situado à distância  $x_1$  do ponto de injeção, na parte mais ativa da nuvem e para uma descarga contínua de vasa  $Q$ , foi

$$S_m = \frac{14,8 x_1^{1/2}}{Q_0}$$

## ii. Ponta do Munduba.

Os dados experimentais indicam a utilização de um modelo bidimensional, em pequena escala, do tipo Okubo Pritchard. A velocidade de difusão é

$$w_1 = 0,017 \text{ m/s}$$

A nuvem longa e estreita, movimentou-se para leste o que concorda com os dados de vento e de corrente reinantes no local. A velocidade média da nuvem era de

$$U_1 = 0,39 \text{ m/s}$$

A diluição estimada para as condições experimentais, nas quais o traçador manteve-se próximo à superfície, foi

$$S_m = \frac{0,091 x_1}{Q_o}$$

tendo  $x_1$  e  $Q_o$  os mesmos significados anteriores.

Comparando os dois trabalhos, verifica-se que, em ambos, as nuvens tomaram formas alongadas e estreitas. A natureza dos fenomenos de dispersão é diferente ao largo das duas Pontas (grande escala em Itaipú, pequena escala no Munduba). Isso quer dizer que a dispersão é pro

duzida por pequenos vórtices na região do Munduba, o que resulta em maior espalhamento.

nml/.

TABELA 6

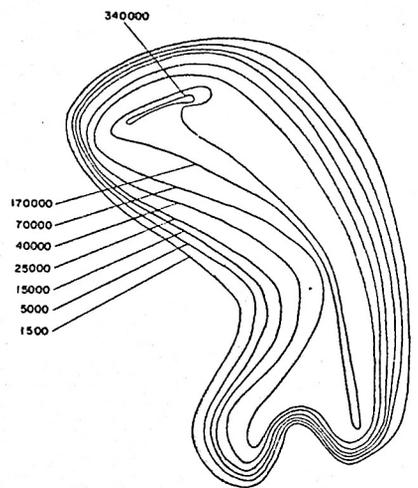
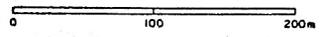
NUVEM B		NUVEM C	
ISOCON- TAGEM c/ min	AREA m <sup>2</sup>	ISOCON- TAGEM c/ min	AREA m <sup>2</sup>
230.000	3560		
100.000	12760		
50.000	23600	50.000	640
10.000	35.520	10.000	40.120
4.000	47.760	4.000	132.420
1.500	62.600	1.500	244.320
500	76.080	500	339.400

$$\ln C = -m A + \ln C_0$$

m	$\ln C_0$	m	$\ln C_0$
$-8,561 \times 10^{-5}$	12,590	$-1,214 \times 10^{-5}$	10,209

2600  
2500  
2400  
2300  
2200  
2100  
2000  
1900  
1800  
1700

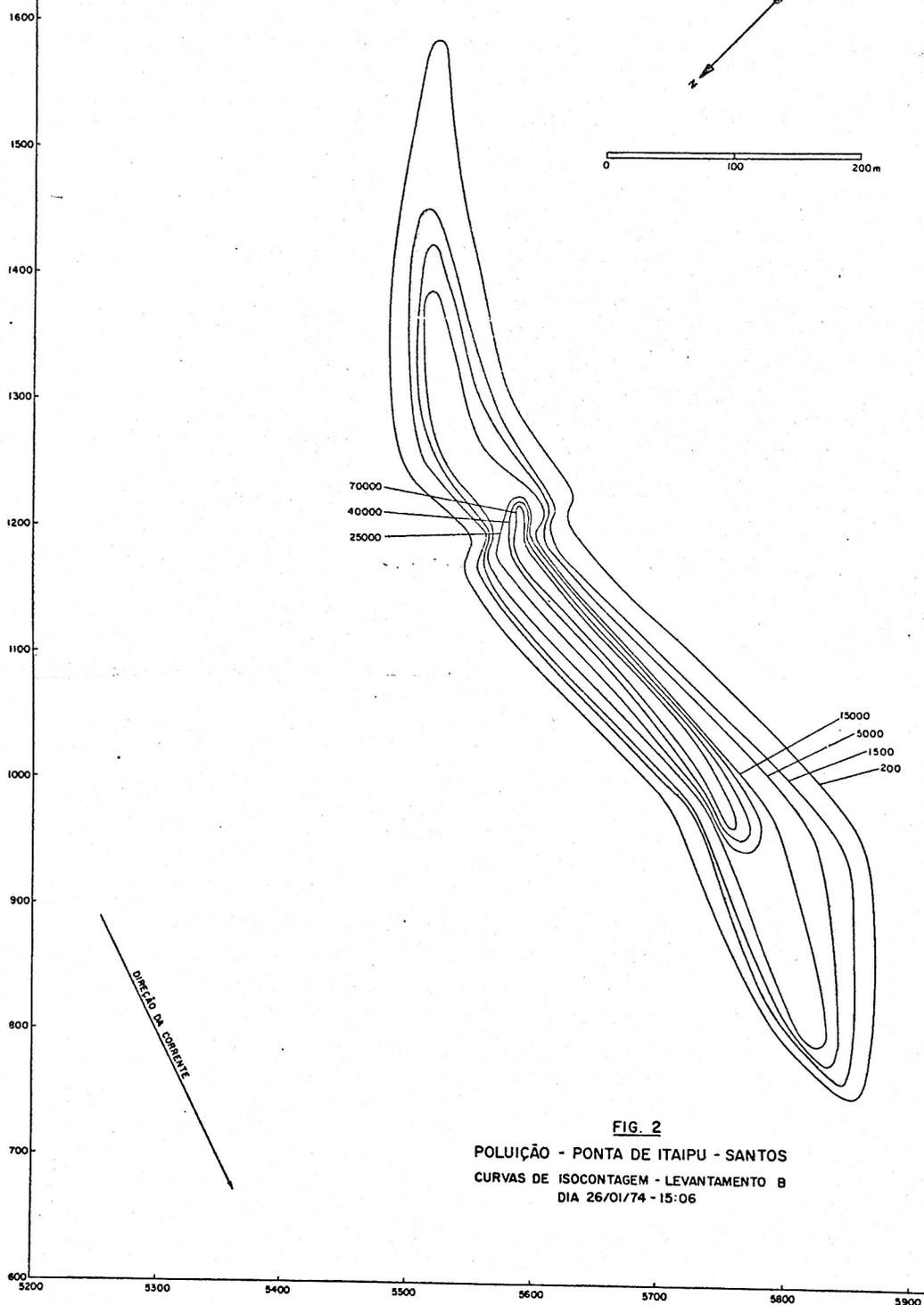
⊙  
P.I.



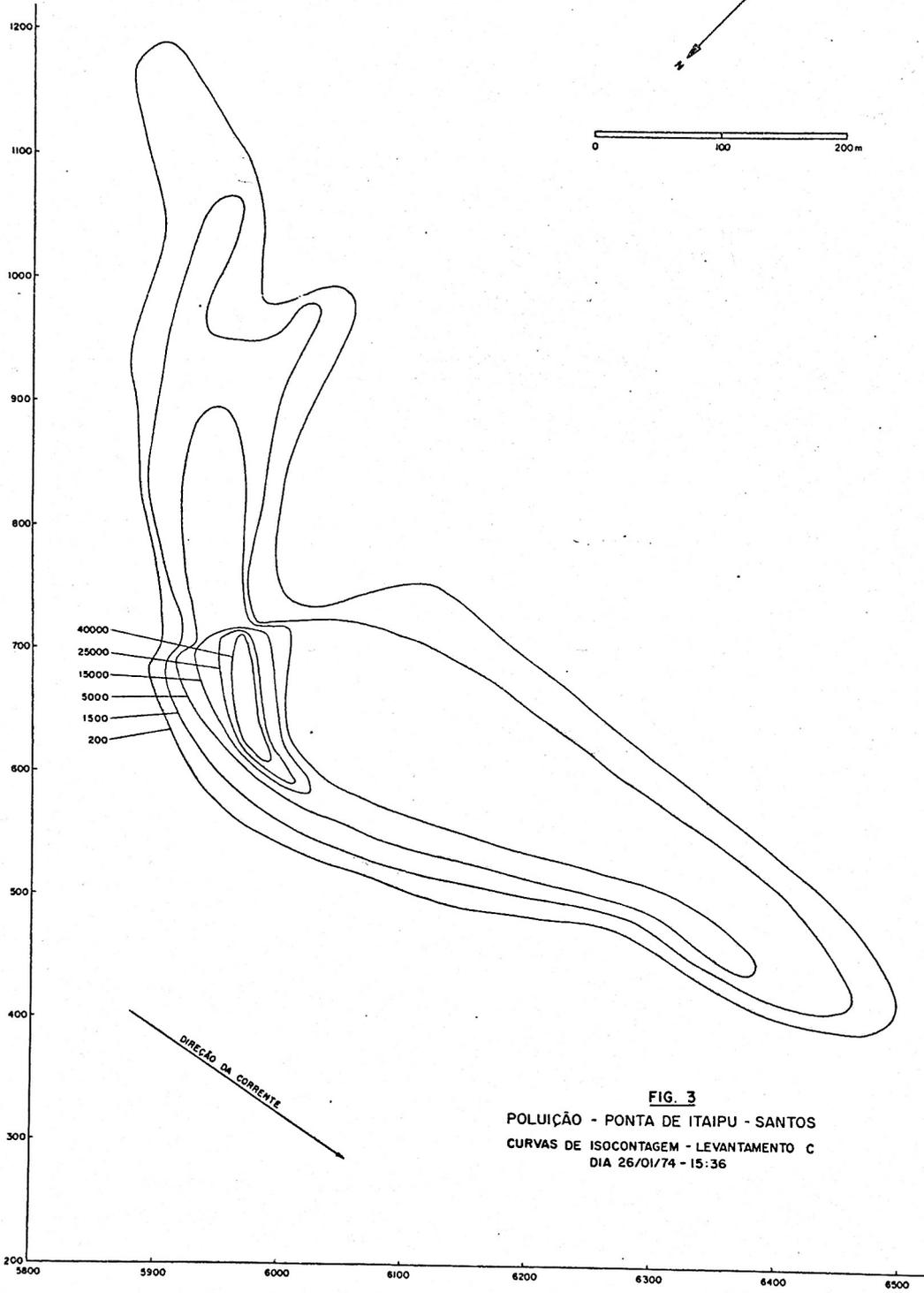
▽ MEDIDAS CONVENCIONAIS

1800 4500 4600 4700 4800 4900 5000 5100 5200

**FIG. I**  
**POLUIÇÃO - PONTA DE ITAIPU - SANTOS**  
**CURVAS DE ISOCONTAGEM - LEVANTAMENTO A**  
**DIA 26/01/74 - 13:59**



**FIG. 2**  
**POLUIÇÃO - PONTA DE ITAIPU - SANTOS**  
**CURVAS DE ISOCONTAGEM - LEVANTAMENTO B**  
**DIA 26/01/74 - 15:06**



**FIG. 3**  
 POLUIÇÃO - PONTA DE ITAIPU - SANTOS  
 CURVAS DE ISOCONTAGEM - LEVANTAMENTO C  
 DIA 26/01/74 - 15:36

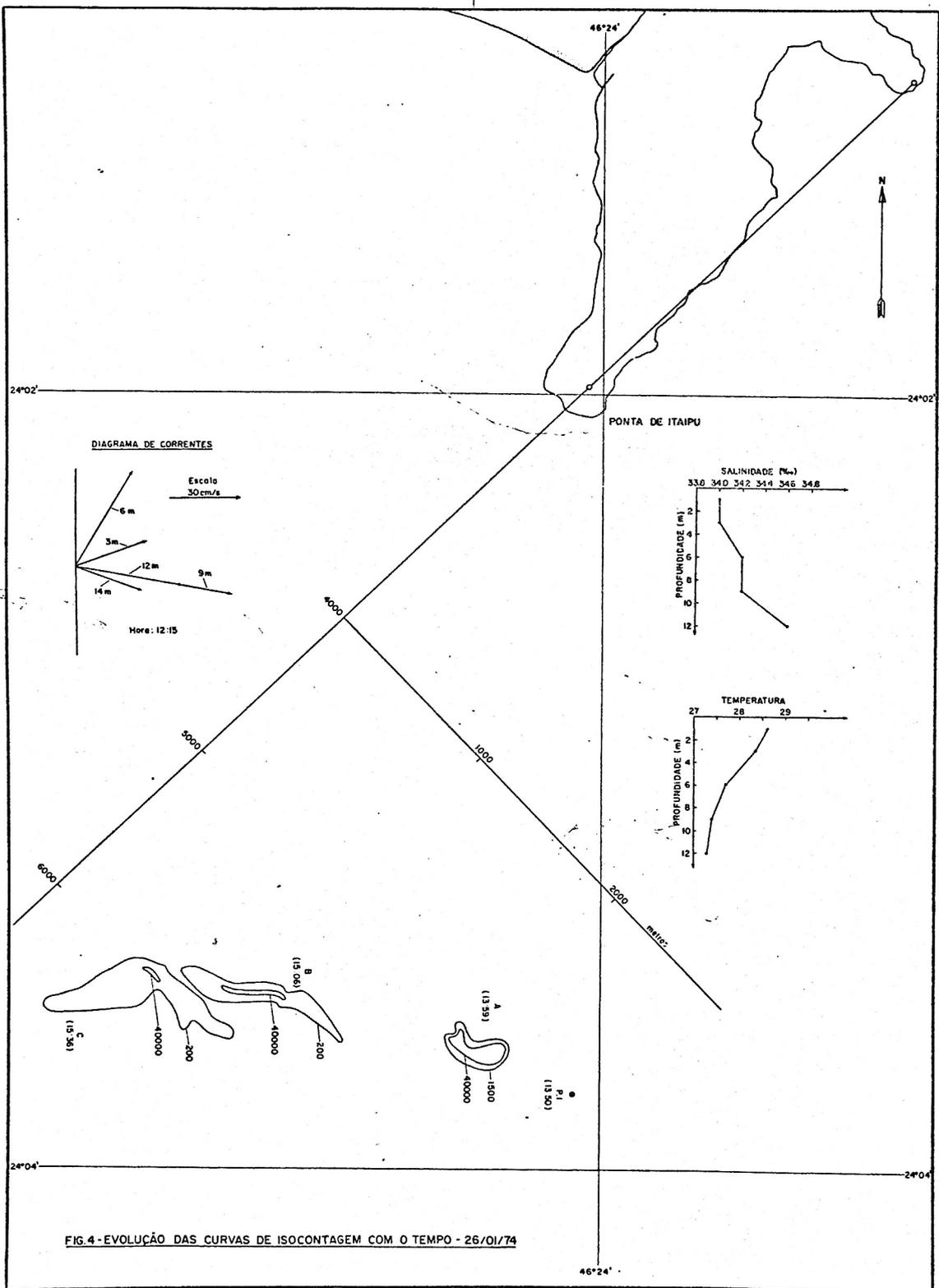


FIG.4 - EVOLUÇÃO DAS CURVAS DE ISOCONTAGEM COM O TEMPO - 26/01/74

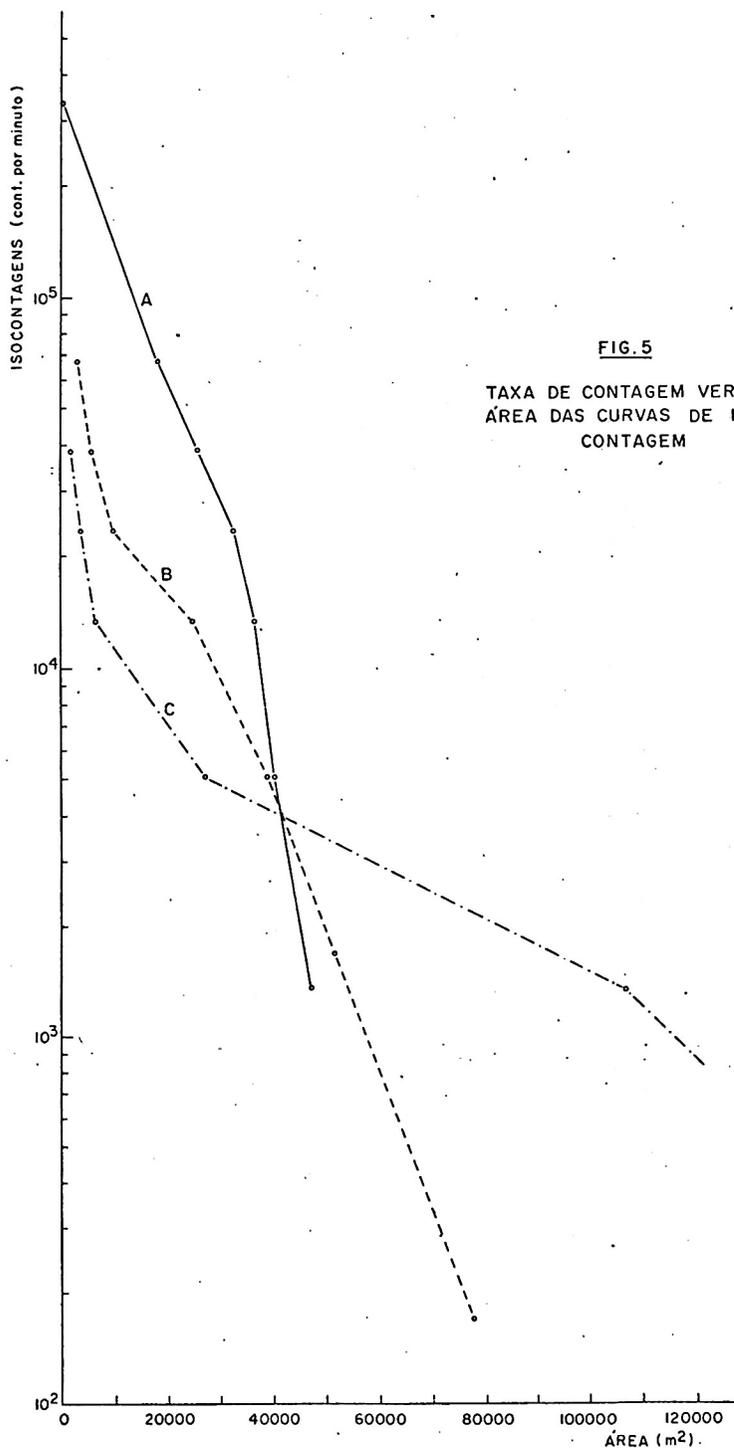


FIG. 5

TAXA DE CONTAGEM VERSUS  
 ÁREA DAS CURVAS DE ISO-  
 CONTAGEM

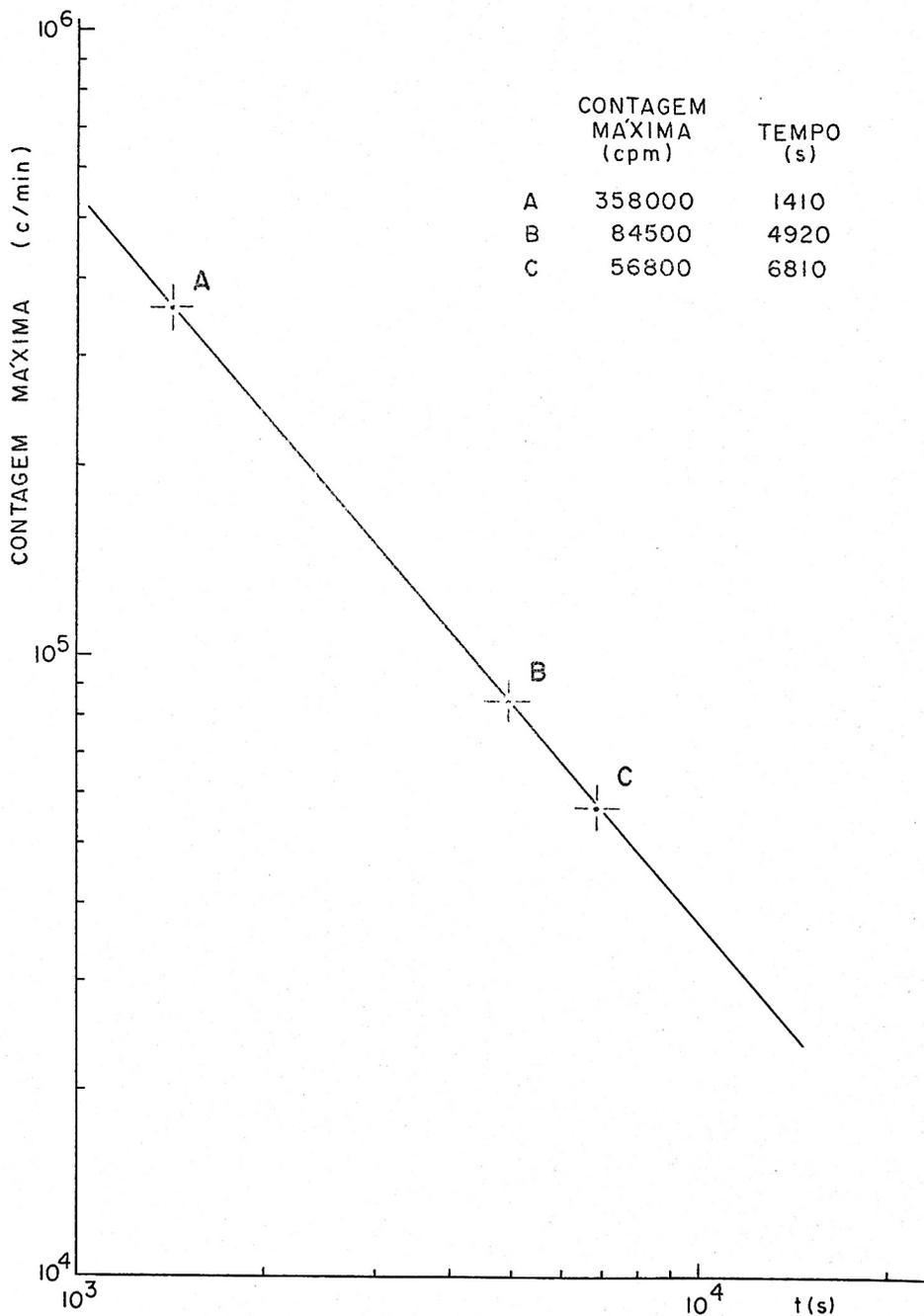


FIG. 6- MAIOR CONTAGEM EM CADA NUVEM VERSUS TEMPO ENTRE CONTAGENS MÁXIMAS

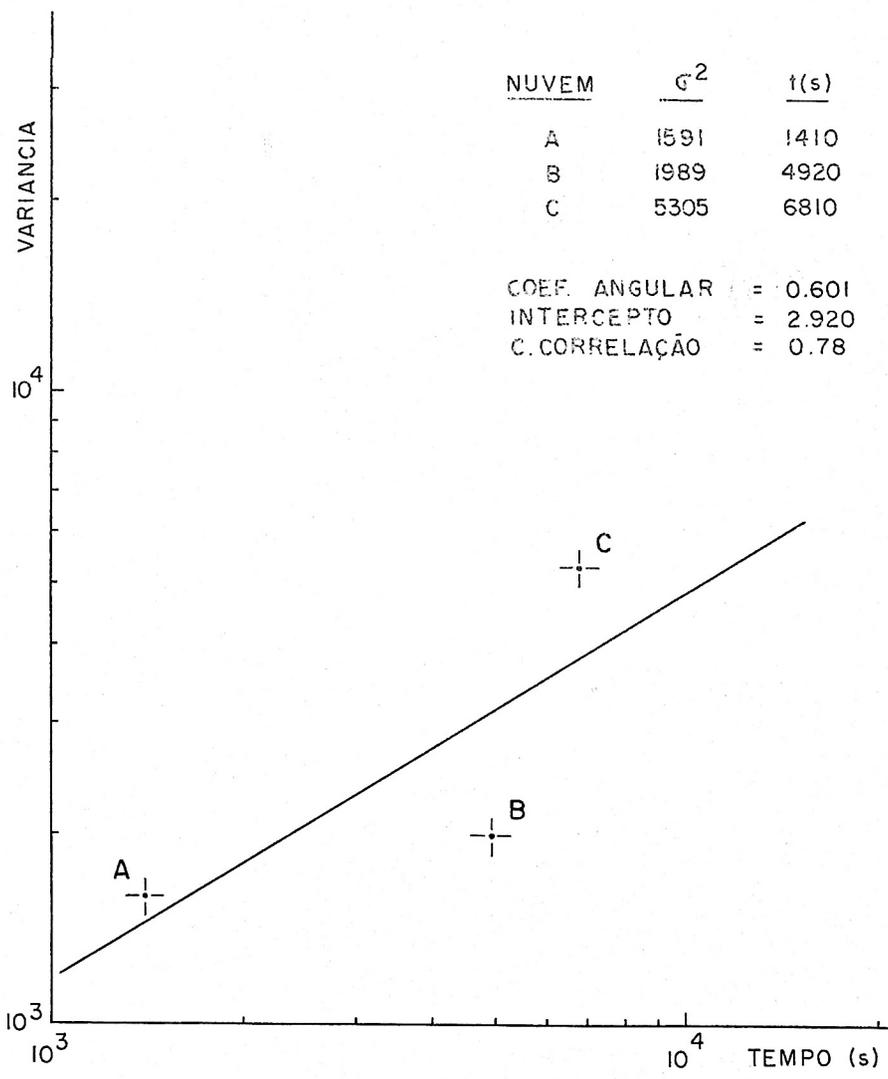


FIG. 7-VARIANCIA VERSUS TEMPO

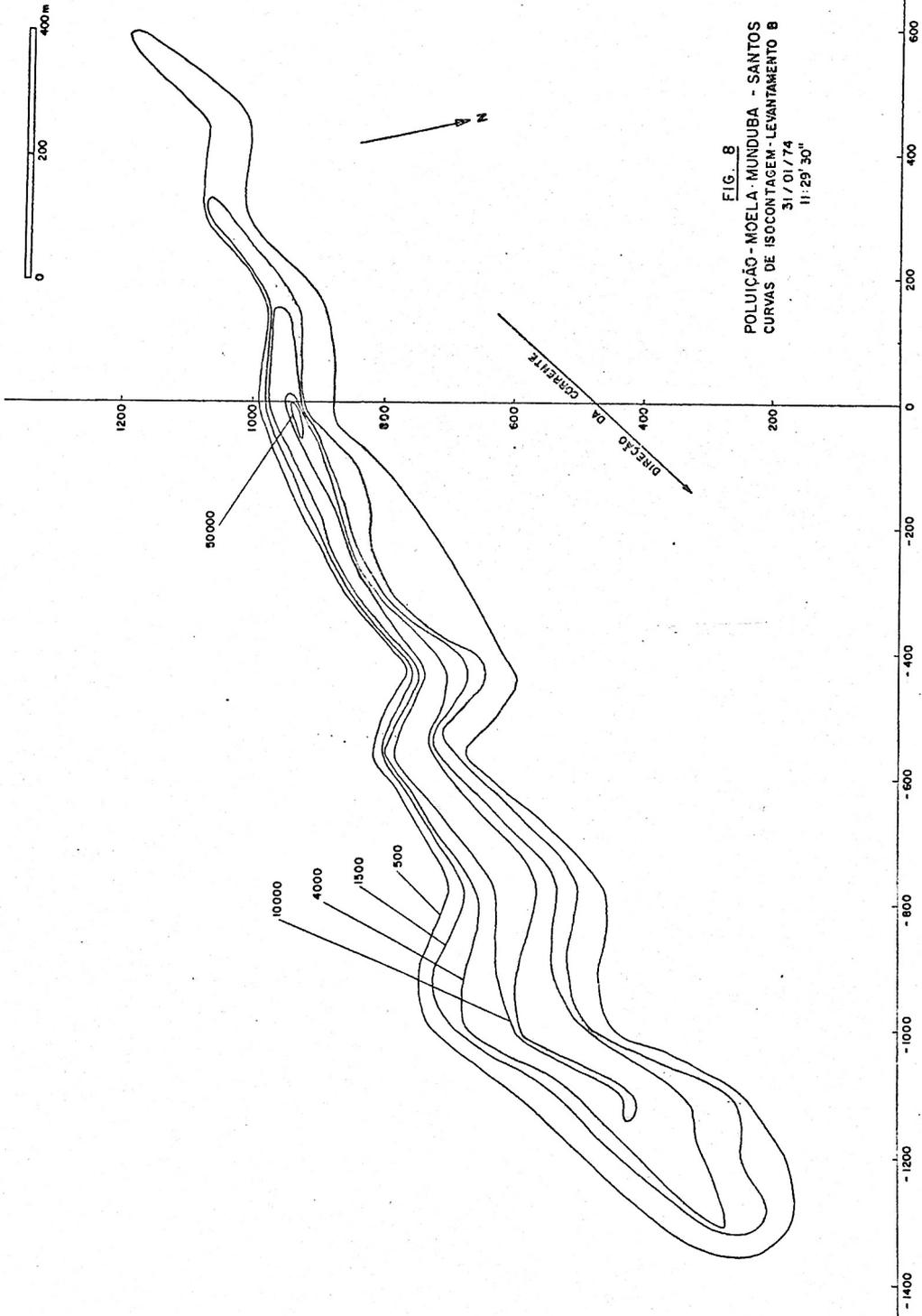
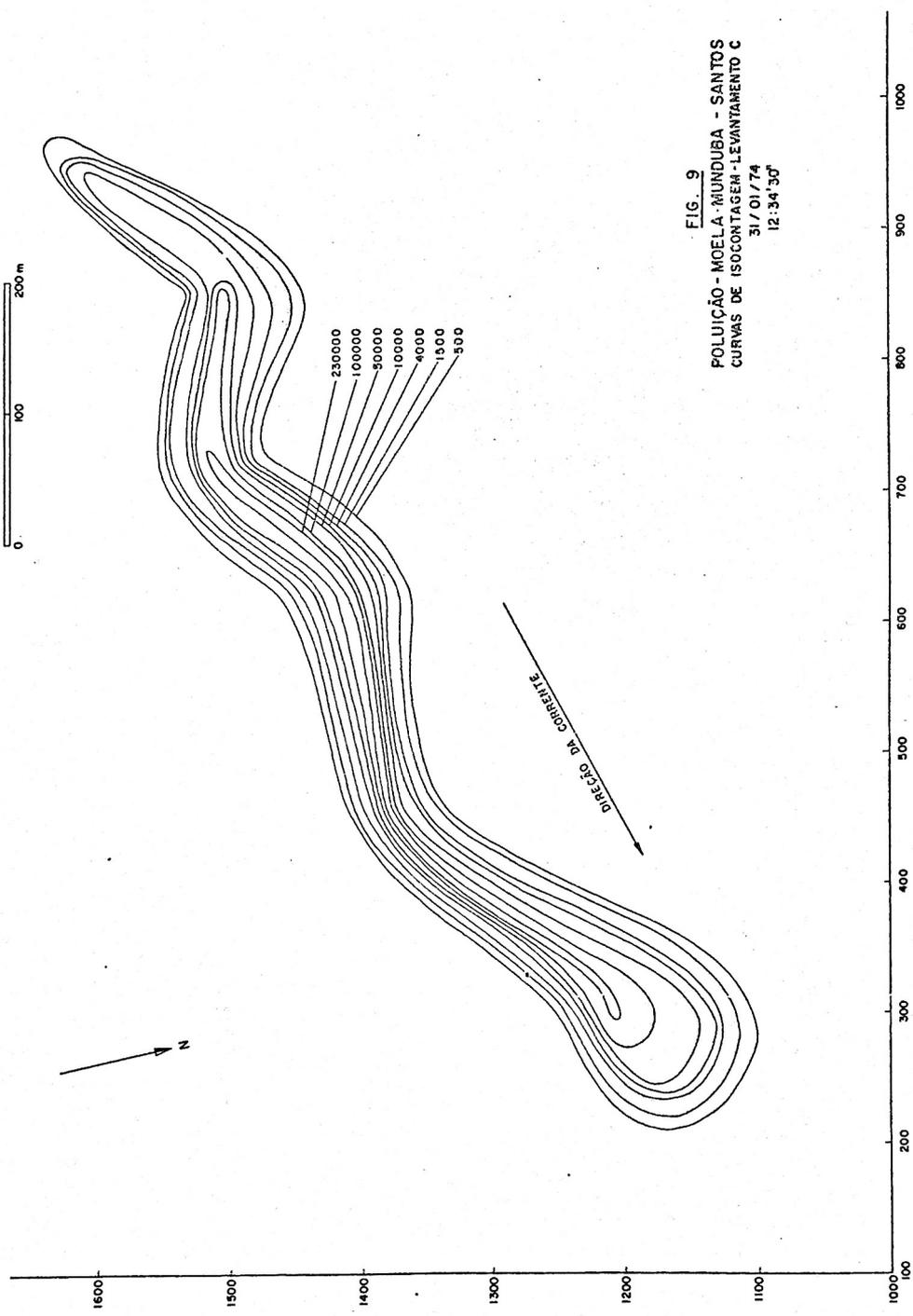


FIG. 8  
POLUIÇÃO - MOELA - MUNDUBA - SANTOS  
CURVAS DE ISOCONTAGEM - LEVANTAMENTO B  
31 / 01 / 74  
11:29' 30"



**FIG. 9**  
**POLUIÇÃO - MOELA-MUNDUBA - SANTOS**  
**CURVAS DE ISOCONTAGEM - LEVANTAMENTO C**  
31/01/74  
12:34 '30"

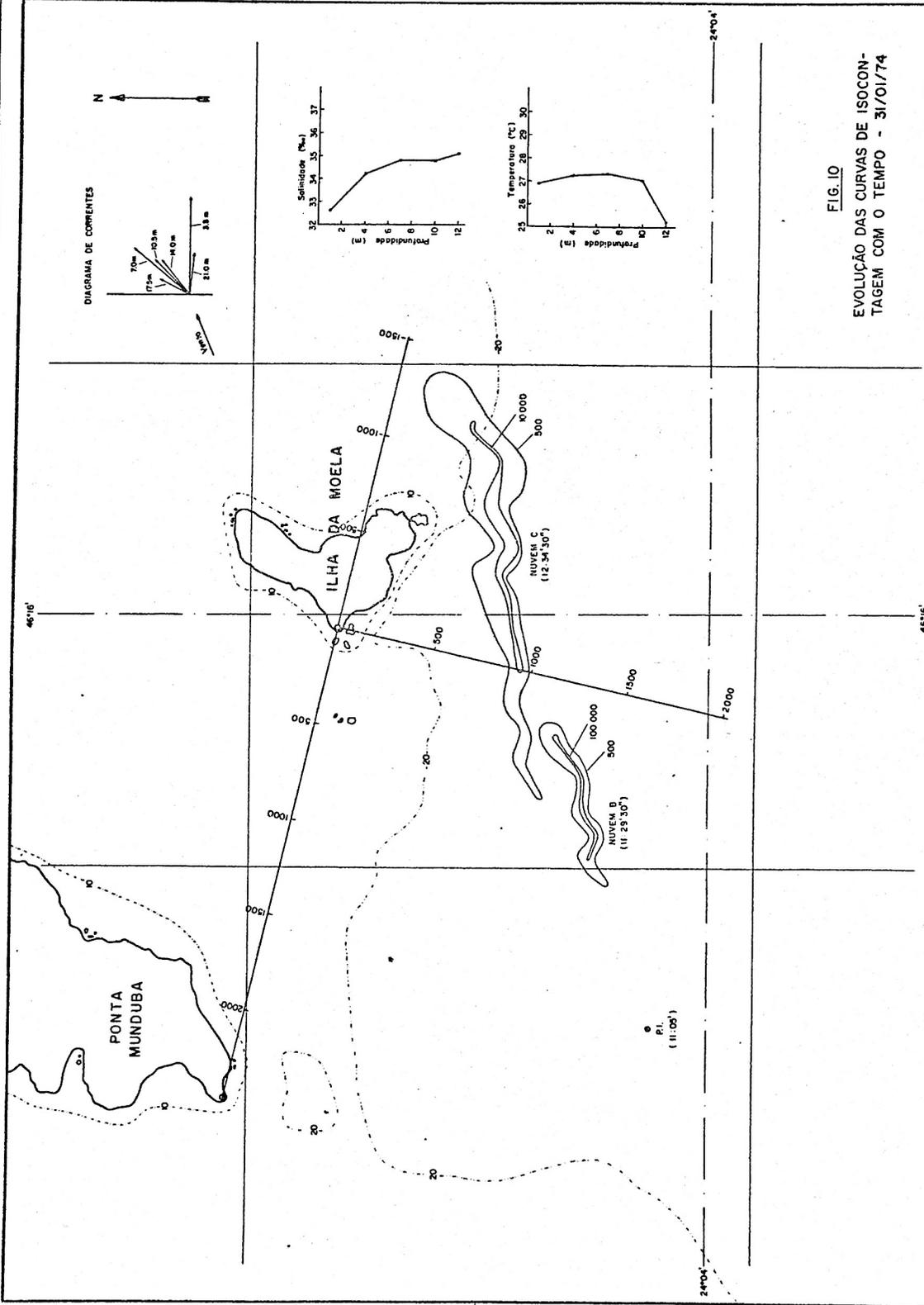


FIG. 10

EVOLUÇÃO DAS CURVAS DE ISOCON-  
 TAGEM COM O TEMPO - 31/01/74

LABORATÓRIO DE RADIOISÓTOPOS  
INSTITUTO DE PESQUISAS RADIOATIVAS

QUARTA PARTE

MEDIDAS DA MOVIMENTAÇÃO DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO,  
NA ÁREA DE SANTOS, COM TRAÇADORES RADIOATIVOS.

COMPANHIA BRASILEIRA DE TECNOLOGIA NUCLEAR

INSTITUTO DE PESQUISAS RADIOATIVAS  
C.P. 1941 - Belo Horizonte - MG

1973/1974

## APRESENTAÇÃO

A Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear, através da Diretoria de Tecnologia e Desenvolvimento, celebrou em 6 de julho de 1973 um Termo de Contrato, com o Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis, cuja ratificação foi firmada em 5 de setembro de 1973.

Foram designados órgãos executantes do Convênio, o Instituto de Pesquisas Radioativas, por parte da CBTN, e o Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias, por parte do DNPVN.

O Convênio visou a execução de estudos de transporte de sedimentos de fundo e em suspensão na Baía de Santos utilizando-se traçadores radioativos e medidas hidráulicas convencionais, ficando o IPR, com o encargo dos trabalhos com radioisótopos e o INPE, responsável pelas medidas das correntes oceânicas, direções, frequência e amplitude de ondas na Baía.

O presente relatório é o quarto relativo aos estudos realizados com traçadores radioativos. Apresentam-se os resultados das medidas relativas aos sedimentos em suspensão nas regiões da Ponta de Itaipú e de Munduba.

Sua parte final resume os dados obtidos nos relatórios anteriores, comenta os resultados das análises executadas sobre os dados hidráulicos disponíveis e apresenta as recomendações de engenharia que se deduzem dos itens anteriores.

Eng. Virgílio Mattos Andrade e Silva

## APENDICE 1.

### MODELOS DE DIFUSÃO TURBULENTA

Um campo de velocidades turbulento, observado em um ponto, pode ser dividido em uma velocidade média em relação ao tempo,  $\underline{U}$  e em uma velocidade flutuante,  $\underline{u}'(t)$ , de tal modo que a velocidade total é dada por:

$$u(t) = U + u'(t) \quad (1)$$

Acompanhemos agora um elemento do fluido que se movimenta em um campo de turbulência homogêneo, isotrópico e estacionário. Depois de um certo tempo  $\underline{t}$ , o elemento, originalmente situado na origem, moveu-se, na direção  $OX$ , de uma distância:

$$X = \int_0^t u'(t') dt' \quad (2)$$

O valor médio desse deslocamento é igual a zero, mas a sua variância  $\sigma^2$  é diferente de zero.

É possível demonstrar que, para valores pequenos do tempo de difusão, tem-se:

$$\sigma^2 \approx \overline{U'^2} t^2 \quad (3)$$

Para valores grandes do tempo de difusão e supondo-se além disto, que o elemento se move por um processo que esteja de acordo com a lei de difusão de Fick, pode-se mostrar que:

$$\sigma^2 = 2Kt \quad (4)$$

A variância é de importancia fundamental no estudo da difusão turbulenta. Ela pode ser determinada a partir de experiências com traçadores.

Mesmo quando a turbulencia não é isotropica, o método esboçado acima é, muitas vezes, útil de um ponto de vista prático. Dentro do mesmo enfoque, procuremos de terminar a distribuição da concentração de um traçador, introduzindo algumas hipóteses adicionais.

Consideremos um campo turbulento em repouso e suponhamos que, no instante  $t = 0$ , a quantidade de traçador injetada  $M$  está concentrada em um pequeno volume, na origem. Depois de decorrido o tempo  $t$ , a substância dispersou-se em uma nuvem, cujo tamanho é determinado pelo desvio padrão  $\sigma$ . A distribuição de concentração é caracterizada por uma função de densidade de probabilidade, que será suposta tridimensional e Gaussiana. Com estas hipóteses, a concentração média  $C(x, y, z, t)$  é dada por:

$$C(x, y, z, t) = \frac{M}{[2\pi \sigma^2]^{\frac{3}{2}}} \exp \left[ -\frac{x^2 + y^2 + z^2}{2\sigma^2} \right] \quad (5)$$

Este resultado pode ser generalizado facilmente para um escoamento turbulento. Se a sua velocidade média  $\underline{U}$  tem a direção do eixo  $\underline{ox}$ , a coordenada  $\underline{x}$  deve ser substituída por  $(x - Ut)$ .

Aplicando-se o modelo de difusão de Fick, a distribuição de concentração para uma fonte puntual e instantânea, em um escoamento turbulento com a velocidade média  $\underline{U}$ , será:

$$C(x,y,z,t) = \frac{M}{(4\pi Kt)^{\frac{3}{2}}} \exp - \frac{(x-Ut)^2 + y^2 + z^2}{4Kt}, \quad (6)$$

sendo ainda válida a relação (4)

$$\sigma^2 = 2Kt$$

Em vista das condições encontradas no mar, esta equação é frequentemente escrita sob a forma:

$$C(x,y,z,t) = \frac{M}{(4\pi t)^{\frac{3}{2}} (D_x D_y D_z)^{\frac{1}{2}}} \exp - \left[ \frac{(x-Ut)^2}{4D_x t} + \frac{(y-Vt)^2}{4D_y t} + \frac{(z-Wt)^2}{4D_z t} \right] \quad (7)$$

Nesta equação  $\underline{U}$ ,  $\underline{V}$  e  $\underline{W}$  são as velocidades médias nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  e  $D_x$ ,  $D_y$  e  $D_z$  são os coeficientes de difusão. Os valores dos coeficientes de difusão podem variar no espaço, mas são supostos independentes do tempo.

A equação para o caso bidimensional, desprezando-se a difusão em profundidade, é obtida da mesma maneira:

$$C(x, y, t) = \frac{M}{4\pi H t (D_x D_y)^{\frac{1}{2}}} \exp - \left[ \frac{(x-Ut)^2}{4D_x t} + \frac{(y-Vt)^2}{4D_y t} \right] \quad (8)$$

Esta última equação corresponde a uma fonte linear e vertical, sendo  $\underline{H}$  a profundidade. Tanto a variância como os coeficientes de difusão podem ser determinados a partir de experiências com traçadores.

Em muitos trabalhos teóricos, a distribuição observada, que é mais ou menos irregular, é convertida em uma distribuição radialmente simétrica:

$$C(r, t) = \frac{M}{\pi \sigma_r^2} \exp - \frac{r^2}{\sigma_r^2} \quad (9)$$

Entre essas aproximações teóricas, uma das mais gerais é devida a Okubo, que propôs a equação diferencial (10) para o caso de movimento em relação ao centro de massa:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ a f(t) r^{m+1} \frac{\partial c}{\partial r} \right] \quad (10)$$

onde  $r$  é a distancia ao centro de massa,  $a$  e  $m$  são constantes arbitrárias e  $f(t)$  é uma função do tempo.

Entre as várias soluções propostas, explicitemos aquelas que dão como resultado distribuições gaussianas:

i. Fick  $[f(t) = 1; m = 0]$ . Esta solução tem a mesma forma que a equação (9):

$$C(r,t) = \frac{M}{4\pi Kt} \exp - \left[ \frac{r^2}{4Kt} \right] \quad (11)$$

onde  $K$  é um coeficiente de difusão ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

ii. Obukhov  $[f(t) = t^2; m = 0]$

$$C(r,t) = \frac{M}{\pi\beta^3 t^3} \exp - \left[ \frac{r^2}{\beta^3 t^3} \right] \quad (12)$$

onde  $\beta$  é um parametro de dissipação de energia ( $\text{cm}^{2/3}/\text{s}$ )

iii. Okubo - Pritchard  $[f(t) = t; m = 0]$

$$C(r,t) = \frac{M}{\pi w^2 t^2} \exp - \frac{r^2}{w^2 t^2} \quad (13)$$

onde  $w$  é uma velocidade de difusão (cm/s).

Em todas essas soluções,  $M$  é a quantidade de substância por unidade de profundidade, numa injeção pontual. Cada uma delas tem seus limites de aplicabilidade. De acordo com Batchelor, o processo de difusão pode ser dividido em três estágios - pequena escala, escala intermediária e grande escala. Cada uma delas é definida pela relação entre o desvio padrão  $\sigma$  e um valor  $L$  que caracteriza o tamanho dos vórtices causados pela turbulência. Com base nesta análise, determinou-se que a solução de Okubo-Pritchard é aplicável na fase inicial do processo de dispersão, quando os vórtices são muito grandes em relação às dimensões da nuvem. Em escala intermediária, aplica-se a solução de Obukhov e em grande escala, a de Fick. No caso prático, o modelo a ser aplicado é determinado pela comparação da dependência de  $\sigma^2$  com o tempo obtida experimentalmente - com as dependências teóricas. Na solução de Okubo-Pritchard, tem-se, por exemplo,

$$\sigma^2 \approx w^2 t^2 ; \quad (14)$$

se a relação experimental entre  $\sigma^2$  e  $t^2$  apresentar a forma  $\sigma^2 = \text{constante} \cdot t^2$ , essa deve ser a solução utilizada. O raciocínio é idêntico para as soluções de Obukhov:

$$\sigma^2 \approx \beta^3 t^3 \quad (15)$$

e de Fick:

$$\sigma^2 = 2Kt \quad (16)$$

Na prática, os valores de  $\sigma^2$  são plotados contra o tempo, em uma escala duplamente logarítmica. Determina-se em seguida, por um método de ajuste, a melhor reta que passe pelos diferentes valores de  $\sigma^2$ . O coeficiente angular dessa reta, define a escala conforme o seu valor esteja próximo de 1 (Fick), de 2 (Okubo-Pritchard) ou de 3 (Obukhov).

Este é o método que foi utilizado neste relatório, na análise dos dados experimentais, para a determinação do modelo matemático a ser empregado.

Tanto o modelo de Okubo-Pritchard como o de Obukhov são aplicáveis à difusão bidimensional, não incluindo a dispersão do traçador em profundidade. O modelo de Fick é aplicável tanto ao caso bidimensional, como à dispersão em três dimensões.

O modelo para o caso bidimensional é explicitado na fórmula (8).

Façamos nela,

$$C_o = \frac{M}{4\pi Ht (D_x D_y)^{\frac{1}{2}}} \quad (17)$$

sendo que  $C_o$  representa a concentração máxima do traçador.

A expressão (17) tem a forma

$$C_o = \text{constante} \cdot t^{-1} \quad (18)$$

Tomando-se os logarítmos naturais dos dois membros, obtem-se

$$\ln C_o = -\ln t + \text{constante}$$

Portanto, um gráfico que represente  $\ln C_o$  versus  $\ln t$  deverá ser uma reta com coeficiente angular  $-1$ , se o modelo a ser aplicado for bidimensional.

O modelo tridimensional é dado pela fôrmula (7). A concentração máxima é

$$C_o = \frac{M}{(4\pi t)^{\frac{3}{2}} (D_x D_y D_z)^{\frac{1}{2}}} \quad (19)$$

que pode ser posta sob a forma

$$C_o = \text{Constante} \cdot t^{-\frac{3}{2}} \quad (20)$$

Tomando-se os logarítmos naturais dos dois membros, obtem-se

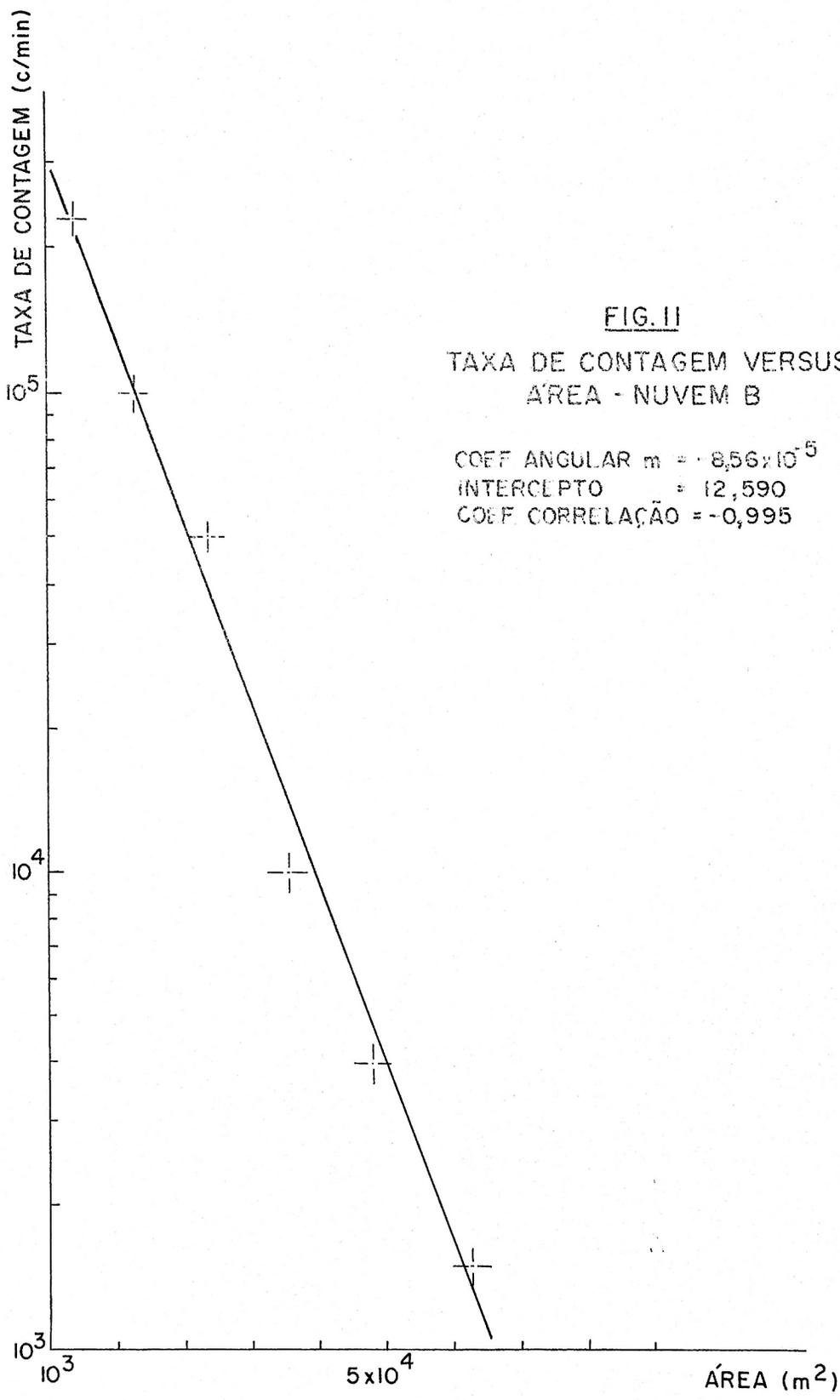
$$\ln C_o = -\frac{3}{2} \ln t + \text{constante}$$

Portanto, um gráfico cujas variáveis sejam  $\ln C_0$  e  $\ln t$  deverá ter a forma de uma reta, com inclinação  $-\frac{3}{2}$ , se o modelo a ser utilizado for tridimensional.

Considerações semelhantes podem ser feitas para os modelos bidimensionais de Obukhov e Okubo-Pritchard, sendo as inclinações  $-3$  e  $-2$ , respectivamente. Deste modo, faz-se a seleção do modelo a ser aplicado, restando a determinação de seus parâmetros, obtidos a partir dos dados experimentais.

## REFERENCIAS

- HARREMOES, P.           Theoretical Treatment of Data on Turbulent Dispersion Related to Disposal of Industrial Waste. Report n<sup>o</sup> 2, Research Contract n<sup>o</sup> 402/RB, I.A.E.A., 1967.
- MARRI, A.               Traçadores Radioativos no Controle da Poluição Costeira, I.P.R., 1973.
- KULLENBERG, G.        Turbulent Dispersion. International Training Course on the Control of Pollution in Coastal Waters, 1970.
- COURTOIS, G.         Étude de mouvements de vases par traceurs radioactifs. Note technique DR/AR/64-6, Département des Radioéléments, CEA, 1964.
- HANSEN, J. Aa.;  
EDENS, JJ.            Tracer Studies for Controlling Sewage Disposal. Conf. on Radiation and Isotope Techniques in the Building Industry, Brussels, 1970.



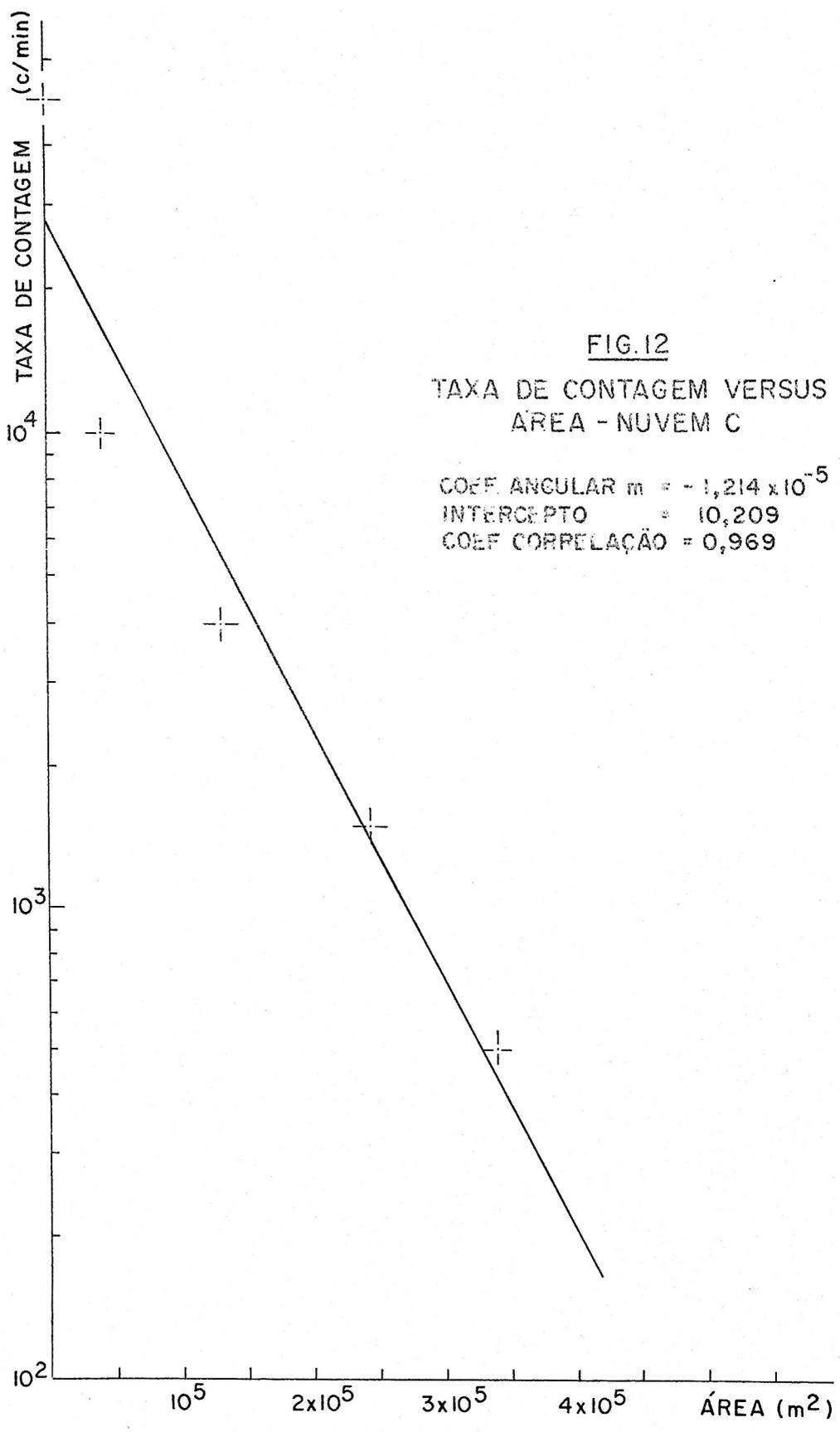


FIG.12

TAXA DE CONTAGEM VERSUS  
ÁREA - NUVEM C

COEF. ANGULAR  $m = -1,214 \times 10^{-5}$   
 INTERCEPTO = 10,209  
 COEF. CORRELAÇÃO = 0,969



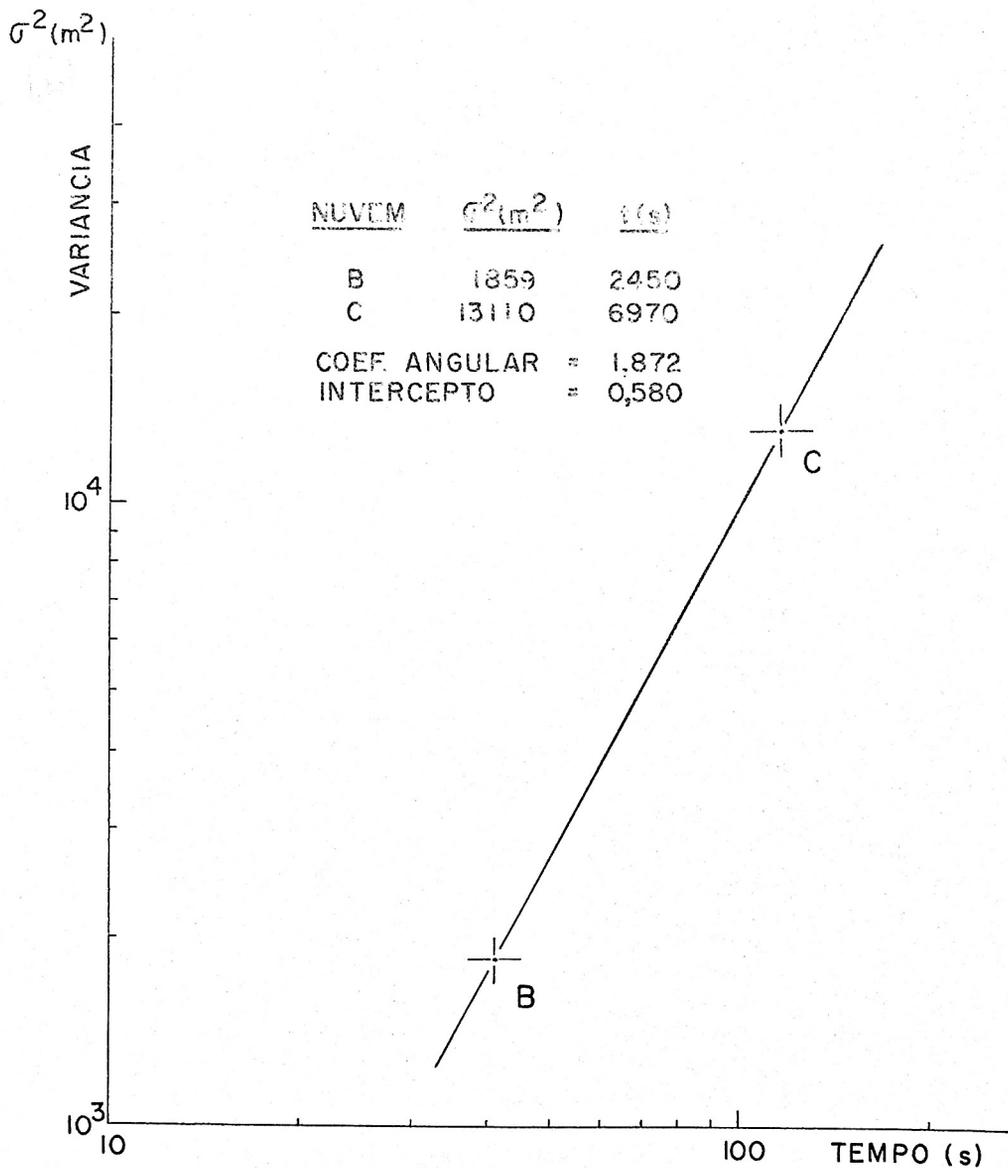


FIG. 14 - VARIANCIA VERSUS TEMPO