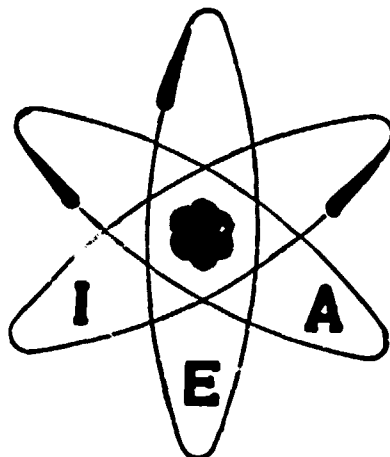


revisado pelo DEIC

em 24/3/74



**ESTUDOS PARA O SISTEMA DE DISPOSIÇÃO OCEÂNICA DOS
ESGOTOS DE SANTOS E SÃO VICENTE — MISTURAÇÃO OCEÂNICA
RELATÓRIO PARCIAL Nº 2**

**W. SANCHEZ, E. GARCIA AGUDO, J. LEOMAX DOS SANTOS, C.
SZULAK e A. G. OCCHIPINTI**

PUBLICAÇÃO IEA N.º 301
Agosto — 1973

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)
CIDADE UNIVERSITÁRIA "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"
SAO PAULO — BRASIL

**ESTUDOS PARA O SISTEMA DE DISPOSIÇÃO OCEÂNICA DOS ESGOTOS
DE SANTOS E SÃO VICENTE – MISTURAÇÃO OCEÂNICA
RELATÓRIO PARCIAL Nº 2**

W. Sanchez, E. Garcia Agudo, J. Leomax dos Santos, C. Szulak e A.G. Occhipinti

**Divisão de Aplicação de
Radioisótopos na Engenharia e na Indústria
Instituto de Energia Atômica
São Paulo – Brasil**

**Publicação IEA Nº 301
Agosto – 1973**

Instituto de Energia Atômica

Conselho Superior

Eng^o Roberto N. Jafet – Presidente
Prof.Dr.Emilio Mattar – Vice-Presidente
Prof.Dr.José Augusto Martins
Dr.Affonso Celso Pastore
Prof.Dr.Milton Campos
Eng^o Helcio Modesto da Costa

Superintendente

Rômulo Ribeiro Pieroni

ESTUDOS PARA O SISTEMA DE DISPOSIÇÃO OCEÂNICA DOS ESGOTOS DE SANTOS E SÃO VICENTE – MISTURAÇÃO OCEÂNICA RELATÓRIO PARCIAL Nº 2

W. Sanchez, E. Garcia Agudo, J. Leomax dos Santos,
C. Szulak e A.G. Occhipinti

RESUMO

Os objetivos deste trabalho foram determinar as leis que governam os fenômenos de diluição e difusão turbulenta de uma substância radioativa, injetada como fonte puntiforme e instantânea, na Baía de Santos, levando em conta distintas condições oceanográficas. À medida que a "nuvem" radioativa formada é arrastada pela corrente e dispersada pelo movimento turbulento, sua configuração se modifica. Em cada experiência, comprovou-se que o tamanho da "nuvem" de traçador radioativo, medido pela sua variância σ_{rc}^2 , guarda uma relação de dependência com o intervalo de tempo transcorrido desde a injeção, e que esta relação é função das condições oceanográficas. A análise dos dados experimentais foi baseada na teoria de difusão proposta por OKUBO.

I – INTRODUÇÃO

Entende-se por misturação oceânica o conjunto de fenômenos físicos que ocorrem no mar provocando um efeito misturador ou homogeneizador de propriedades, tais como temperatura, salinidade e densidade ou de um poluente qualquer.

Quando uma carga de esgoto é lançada em forma de jato, no fundo do oceano, através de difusores de um emissário submarino, ela tende a subir para a camada superficial de águas, em função do empuxo que é proporcional à diferença de densidade entre o esgoto e a água do mar. À medida que o jato caminha em direção à superfície, ele tende a misturar-se com a água do mar, através de um processo oceânico de misturação turbulenta. Quando o jato atinge o nível de equilíbrio hidrostático na camada superficial, estabelece-se o campo de esgoto.

O fenômeno de misturação oceânica é produzido por dois processos físicos principais: advecção ou convecção e difusão⁽¹⁾.

A advecção ou convecção é caracterizada pela variação local da concentração de uma propriedade, pelo transporte realizado por sistemas definidos e regulares de circulação das águas, representados pelos seus campos de velocidades.

A difusão turbulenta é caracterizada pelas variações locais da concentração desta propriedade, produzidas por movimentos irregulares da água, em pequena escala e que ocorrem simultaneamente com a difusão molecular. Neste processo, ocorre uma troca local de propriedades sem que haja um transporte efetivo da água.

Ao efeito conjunto da turbulência oceânica e da difusão molecular chama-se difusão

turbulenta.

Na prática, considera-se que o processo de misturação oceânica inicia-se no momento em que é estabelecido o campo de esgotos. Assim, a corrente local transporta a mancha de esgotos para fora da área de lançamento e durante o transporte, a turbulência oceânica espalha este poluente, a partir do seu centro de gravidade.

Geralmente, analisa-se o movimento turbulento em função da escala de comprimento dos vórtices e seus componentes. Quando as componentes são maiores do que a mancha de esgotos, esta é transportada por advecção, como um todo. Nos casos em que as componentes são menores do que a mancha, origina-se um espalhamento do esgoto no seu próprio seio. Se os vórtices apresentarem dimensões de mesma ordem de grandeza da mancha, esta sofre deformações que contribuem para um espalhamento mais acentuado.

A eficiência com que uma mancha de esgotos se difunde depende dos vórtices médios que são os responsáveis pelas variações espaciais do campo de velocidades médias. Quando a mancha está deformada, ela apresenta um contorno irregular e difuso que sofre atuação acentuada dos vórtices de dimensões menores que as da mancha. O resultado destes efeitos é que a mancha aumenta seu contorno e o poluente tende a se misturar cada vez mais uniformemente com as águas circunjacentes. Quanto mais a mancha aumenta seu tamanho, maiores são as dimensões dos vórtices que contribuem para a advecção.

A análise do espectro de turbulência oceânica mostra que os vórtices de maiores dimensões possuem maior energia cinética que os de menores dimensões, daí a potência aparente do processo de misturação crescer em função do tempo decorrido a partir do início desta misturação⁽²⁾. Como consequência, observa-se que o modelo fickiano de difusão, que admite coeficientes constantes, não é totalmente adequado para equacionar o processo de misturação oceânica.

As considerações acima, aplicáveis principalmente na misturação horizontal da mancha, podem ser estendidas ao caso de misturação vertical, que é um processo menos intenso. É comum (por exemplo, Brooks - 1960)⁽³⁾ adotar-se modelos analíticos que desprezam a misturação vertical para facilitar o equacionamento do mecanismo de misturação oceânica.

II – FORMULISMO BÁSICO PARA O ESTUDO DA MISTURAÇÃO OCEÂNICA

II.1 – Diluição por Misturação Oceânica

Vamos analisar a seqüência de fatos que ocorrem quando o esgoto é lançado continuamente no oceano, com vazão de $Q \text{ m}^3/\text{s}$ e concentração inicial $C_0 \text{ coli/m}^3$. A partir do estabelecimento do campo de esgotos, no instante $t = 0$, uma taxa de $Q C_0 \text{ colis/segundo}$ começam a se difundir, tanto no sentido lateral como no sentido longitudinal de propagação da mancha de esgotos. A difusão lateral conduz à diluição do fluxo contínuo de coliformes, enquanto a advecção longitudinal contribui para que as bactérias atinjam determinado ponto B.

A distribuição no tempo, da diluição e advecção, expressada como fração do poluente que chega a um ponto B, pode ser representada por uma função do tempo de advecção t , isto é, $f(t)_B$. Assim, a concentração total de bactérias do grupo coli que chega em B pode ser

representada pela equação⁽⁴⁾:

$$C_B = Q C_o \int_0^{\infty} f(t)_B \cdot dt \quad \text{coliformes/m}^3 \quad (1)$$

Se desejarmos que a equação acima seja independente do agente poluidor, basta tomarmos os valores relativos das concentrações, isto é,

$$R_B = \frac{C_B}{C_o} = Q \int_0^{\infty} f(t)_B \cdot dt \quad (2)$$

Admitindo que, no instante $t = 0$, saia através do difusor uma solução radioativa de ^{82}Br , a taxa de contagem $F(t)_B$, acusada por um detetor de cintilação, com cristal de NaI(Tl) , posicionado em B, também é uma função do tempo de advecção e pode ser assim representada:

$$F(t)_B = K f(t)_B \quad (3)$$

A constante K leva em conta a sensibilidade S do detetor ($\text{cpm}/\mu\text{Ci}/\text{m}^3$) e a atividade A (μCi) lançada através do difusor. Assim,

$$K = A.S \quad \text{cpm.m}^3 \quad (4)$$

Utilizando-se as equações (2), (3) e (4), pode-se determinar R_B no caso de um lançamento contínuo.

$$R_B = \frac{C_B}{C_o} = Q \int_0^{\infty} f(t)_B \cdot dt = Q \int_0^{\infty} \frac{F(t)_B}{K} dt = \frac{Q}{A.S} \int_0^{\infty} F(t)_B \cdot dt$$

$$R_B = \frac{C_B}{C_o} = \frac{Q}{A.S} \int_0^{\infty} F(t)_B \cdot dt \quad (5)$$

A integral $\int_0^{\infty} F(t)_B \cdot dt$ representa a área sob a curva que indica a variação da taxa de contagem em função do tempo de advecção, no ponto B. A sensibilidade S é determinada em laboratório, calibrando o detetor em uma geometria definida e a atividade A é conhecida no instante do lançamento. Pode-se assumir para Q o valor unitário de $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$.

O formulismo desenvolvido permite calcular a diluição, no caso de um lançamento contínuo de material radioativo. Como tal procedimento é custoso e tedioso porque exige o lançamento de grande quantidade de material radioativo, durante longo período de tempo, o Danish Isotope Centre desenvolveu um método que requer menos radioatividade e um lançamento instantâneo e puntiforme⁽⁵⁾.

Se, no mesmo ponto onde foi realizado o lançamento contínuo de material radioativo, lançarmos instantaneamente uma atividade A, o detetor de cintilação situado no ponto B indicará que a concentração versus tempo de advecção poderá ser representada por uma curva que tem a forma da função gaussiana.

Desde que as condições oceanográficas permaneçam constantes, o equivalente a uma injeção instantânea pode ser extraído de uma injeção contínua, considerando-se a parcela introduzida no mar, em um segundo. A injeção instantânea contribuirá com uma curva concentração-tempo, de mesma natureza que a obtida pelo lançamento contínuo, cuja integral é constante. Assim, no lançamento contínuo, injetamos $Q C_o \mu\text{Ci}$ e medimos $C_B \mu\text{Ci}/\text{m}^3$. No lançamento puntiforme, injetamos $A \mu\text{Ci}$ e medimos $C_B' \mu\text{Ci}/\text{m}^3$. Pode-se escrever que

$$\frac{Q C_o}{A} = \frac{C_B}{C_B'}, \text{ onde } C_o \text{ é a concentração do traçador em } \frac{\mu\text{Ci}/\text{m}^3}{\text{s}} \quad (6)$$

$$C_B = C_B' \frac{Q C_o}{A} \quad (7)$$

A concentração constante, $C_B \mu\text{Ci}/\text{m}$ no ponto B, proveniente da injeção contínua, pode ser considerada como a soma das contribuições produzidas por todas as injeções discretas em que pode ser dividida a injeção contínua. Isto corresponde a uma integração da curva de concentração versus tempo de advecção.

$$C_B = \frac{Q C_o}{A} \int_0^{\infty} C_B' \cdot dt \quad (8)$$

Antes da chegada da onda radioativa, o detector de cintilação localizado no ponto B conta certo número de fótons gama provenientes da radiação cósmica e radioatividade natural das águas. Esta taxa de contagem n' é chamada "background" ou contagem de fundo e pode ser considerada como uma constante. Quando a onda radioativa atinge o detector, a taxa de contagem aumenta para um valor n , correspondente a uma concentração C_B' . Dentro de um grande intervalo de concentrações, pode-se afirmar que

$$C_B' = \frac{n - n'}{S} \mu\text{Ci}/\text{m}^3 \quad (9)$$

onde S , expresso em $\text{cpm}/\mu\text{Ci}/\text{m}^3$, representa a sensibilidade do detector de cintilação.

Substituindo (9) em (8), temos:

$$C_B = \frac{Q C_o}{S.A} \int_0^{\infty} (n - n') \cdot dt \quad (10)$$

$$R_B' = \frac{C_B}{C_o} = \frac{Q}{A.S} \int_0^{\infty} (n - n') \cdot dt \quad (11)$$

Comparando as equações (11) e (5), vemos que são idênticas, pois $\int_0^{\infty} (n - n') \cdot dt$

representa a área sob a curva que indica a variação da taxa de contagem do traçador em função do tempo de advecção, no ponto B.

Substituindo a variável tempo dt pela variável espacial dx , temos:

$$dt = \frac{1}{U} dx, \text{ onde } U \text{ é a velocidade do deslocamento do campo;}$$

$$R_B = \frac{Q}{A.S} \frac{1}{U} \int_{x_1}^{x_2} (n - n') \cdot dx \quad (12)$$

Como $\frac{Q}{A.S}$ é constante, a equação (12) pode ser assim expressa:

$$R_B = \frac{K}{U} \int_{x_1}^{x_2} (n - n') \cdot dx \quad (13)$$

A curva de concentração versus tempo, no ponto B, tem a forma da função gaussiana.

Sendo x_1 e x_2 os pontos onde a curva atingiria os limites de detecção; (cpm/mm) a escala do eixo y ; (m/mm) a escala do eixo x e N a área sob esta curva, a equação (13) assume a seguinte forma prática:

$$R_B = \frac{K}{U} \cdot N \cdot a \cdot \ell \quad \text{onde } K = \frac{Q}{A.S} \quad (14)$$

11.2 – Difusão

A difusão turbulenta de um poluente é problema importante não só do ponto de vista teórico como experimental. O processo de difusão oceânica é complexo e sua interpretação ainda depende de muitas hipóteses ou aproximações empíricas provenientes de dados experimentais obtidos em diferentes condições oceanográficas e de contorno.

O estudo de difusão na Baía de Santos foi baseado no formulismo de OKUBO⁽⁶⁾, sendo admitidas as seguintes hipóteses:

1 – O lançamento da solução radioativa, aproxima-se tanto quanto possível de uma fonte puntiforme injetada instantaneamente. Antes do lançamento, a solução radioativa é misturada com uma solução de fluoresceína, possibilitando estimar-se as dimensões iniciais da mancha no instante do lançamento, e duração do mesmo. Se a injeção real não for puntiforme, pode-se calcular o intervalo de tempo t_c após o qual as características da mancha poderiam ser consideradas idênticas às obtidas em uma injeção puntiforme ideal. Considerando-se uma distribuição de concentração bidimensional, proveniente de uma fonte puntiforme lançada instantaneamente no mar, tem-se:

$$S = S(x,y,t) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} S \cdot dx \cdot dy = 1 \quad (15)$$

O valor médio de qualquer propriedade $f(x,y,t)$ associado com S, pode ser assim definido:

$$\bar{f} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f \cdot S \cdot dx \cdot dy \quad (16)$$

Tomando-se como origem do sistema de coordenadas (x,y) o centro de gravidade da distribuição S, tem-se $\bar{x} = \bar{y} = 0$. Define-se a distância quadrática média, isto é, a variância da distribuição S, pela equação:

$$\sigma_r^2 = \bar{r}^2 = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} (x^2 + y^2) \cdot S \cdot dx \cdot dy \quad (17)$$

A teoria de JOSEPH e SENDNER, referida por OKUBO⁽⁷⁾ estabelece a relação:

$$\sigma_o^2 = 6 \sigma_v^2 t_o^2 \quad (18)$$

onde

σ_o^2 é a variância associada às dimensões iniciais da mancha;

σ_v é definida como a velocidade de difusão;

t_o é o tempo transcorrido entre o lançamento puntiforme e o instante em que a mancha atinge uma variância σ_o .

O tempo crítico deve ser superior a t_o . Na prática, considerou-se $t_c = 10 t_o$. Não devem ser levados em conta os dados experimentais de difusão obtidos antes de transcorrer o tempo crítico.

2 – Durante os períodos de observação, constatou-se que a difusão vertical era desprezível. Dois detetores de cintilação, posicionados em diferentes profundidades (0,5 m e 1,0 m), forneceram informações relativas à variação da concentração da solução radioativa em profundidade, demonstrando-se, portanto, a validade do modelo bi-dimensional.

Levando-se em conta que,

- a) o lançamento da solução radioativa no mar é instantâneo e puntiforme;
- b) o ponto de lançamento é considerado como origem do sistema de coordenadas (x,y) , sendo o eixo x coincidente com o sentido da corrente e o eixo y perpendicular a este deslocamento;
- c) o centro de gravidade da mancha radioativa se desloca com a mesma velocidade da corrente;
- d) a distribuição superficial da concentração da solução radioativa obedece a uma distribuição bi-dimensional de Gauss e os picos da mesma coincidem com o centro da mancha,⁽⁸⁾;

a equação de difusão é a seguinte:

$$S(x,y,t) = S_o(x_o, y_o, t) e^{-\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x-x_o}{\sigma_x} \right)^2 + \frac{y^2}{\sigma_y^2} \right]} \quad (19)$$

σ_x e σ_y são as componentes da variância nas direções x e y;
 S_0 é a concentração superficial no centro da mancha.

A relação entre a concentração superficial, S, e a concentração volumétrica, Sv, em profundidade, é

$$S_v = \int_0^d S \cdot dz \quad (20)$$

onde

z é a coordenada na direção vertical e d, a espessura da mancha radioativa.

3 – A distribuição da concentração volumétrica deve concordar com a quantidade injetada inicialmente, tomando por base o princípio de conservação da massa, descontando-se a radiação de fundo e o decaimento radioativo.

Na Baía de Santos, na maioria das vezes, a diferença entre a solução injetada e a detetada foi da ordem de 30%. Segundo OKUBO⁽⁹⁾, variações até da ordem de 150% podem ser aceitas, desde que os experimentos sejam realizados em mar aberto.

III – DIAGRAMAS DE DIFUSÃO

Diagrama de difusão é um gráfico onde se correlaciona duas propriedades características do fenômeno, como, por exemplo, a variância de uma distribuição horizontal de concentração de solução radioativa e tempo de difusão da mesma.

A variância da distribuição superficial da concentração da solução radioativa pode ser considerada como uma medição conveniente do espalhamento de um poluente no mar. A difusão horizontal no oceano não pode ser adequadamente representada pela equação de FICK, com coeficiente de difusão constante. A difusão oceânica deve ser estudada através de outro formulismo, pois é fato comprovado que a difusividade aparente aumenta com o tempo de difusão ou com as dimensões da mancha da substância que se difunde.

A variância pode ser calculada medindo-se a variação horizontal da concentração de solução radioativa a uma profundidade fixa (1,0 metro na Baía de Santos), utilizando-se um barco que cruza a mancha ao longo de sua trajetória, varrendo-a totalmente. Como a distribuição horizontal de substância é normalmente assimétrica, sendo maior no sentido da corrente, deveríamos considerar duas variâncias (σ_x^2 e σ_y^2 , tal que $\sigma_r^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$), para descrever corretamente o fenômeno. Por facilidade de cálculo e por ser um procedimento normalmente utilizado, as manchas assimétricas são transformadas em manchas equivalentes, com distribuição de concentração radialmente simétrica⁽¹⁰⁾.

A distribuição bi-dimensional de traçadores pode ser representada teoricamente por uma distribuição radial gaussiana.

$$S(t, r_e) = \frac{M/D}{\pi \sigma_{rc}^2(t)} e^{-\frac{r_e^2}{\sigma_{rc}^2(t)}} \quad (21)$$

onde

M/D representa a massa de corante por unidade de profundidade.

$\sigma_{rc}^2(t)$ é a variância da distribuição radialmente simétrica

r_e é o raio equivalente

Experimentalmente, entretanto, constata-se que a distribuição radial é melhor representada pela equação

$$S(t, r_e) = S(t, 0) e^{-\left(\frac{r_e}{\sigma_{rc}(t)}\right)^m} \quad (22)$$

onde

$S(t, 0)$ é a concentração máxima do traçador no pico e m é um expoente real positivo calculado estatisticamente.

Para calcular $\sigma_{rc}(t)$ pela equação (22), é necessário conhecer $S(t, 0)$, isto é, a máxima concentração de atividade em cada mancha radialmente simétrica. Este dado é de difícil obtenção experimental pelo fato das medições de atividade no mar serem realizadas ao longo das trajetórias do barco que cortam a mancha. Como existe certo espaçamento entre estas trajetórias, é pequena a probabilidade de que uma das trajetórias coincida exatamente com a máxima atividade da mancha. Para se obter $S(t, 0)$, recorre-se a uma correlação estatística.

Representando-se $\log S(t, r_e) = f(r_e^2)$, obtém-se uma curva bem comportada que, extrapolada para $r_e^2 = 0$, possibilita-nos obter $\log S(t, 0)$ como intercepto.

De posse do valor $S(t, 0)$, sua substituição na equação (23) permite calcular m e σ_{rc} . Temos

$$\ln S(t, r_e) = \ln S(t, 0) - \left(\frac{r_e}{\sigma_{rc}}\right)^m$$

$$\ln \frac{S(t, 0)}{S(t, r_e)} = \left(\frac{r_e}{\sigma_{rc}(t)}\right)^m$$

Aplicando-se log decimal a ambos os membros,

$$\log \ln \frac{S(t, 0)}{S(t, r_e)} = m \log r_e - m \log \sigma_{rc}(t) \quad (23)$$

Representando graficamente $\log \left[\ln \frac{S(t, 0)}{S(t, r_e)} \right] = f(\log r_e)$, obtém-se uma reta cujo coeficiente angular é m e a ordenada na origem, $m \log \sigma_{rc}(t)$, o que permite calcular $\sigma_{rc}(t)$.

Este parâmetro é importante para a determinação das equações de difusão na Baía de Santos. A sua correlação com o tempo de difusão é da forma

$$\sigma_{rc}^2 = a \cdot t^b \quad (24)$$

No modelo de difusão de FICK, que supõe difusividade constante, b seria igual à unidade. Como este modelo não é adequado para explicar a difusão turbulenta nos oceanos, b deve ser maior que 1, pois é fato comprovado que a difusividade aumenta à medida que aumenta o tempo de difusão. OKUBO⁽⁷⁾ obteve a lei:

$$\sigma_{rc}^2 = 0,0108 t^{2,34}$$

$$\sigma_{rc}^2 \text{ em cm}^2$$

$$t \text{ em seg.}$$

Utilizando-se os valores de $\sigma_{rc}(t)$, obtidos a partir da equação (24), é possível estabelecer as condições reinantes na Baía de Santos. Representando-se $\log(\sigma_{rc}^2) = f(t)$, e utilizando o método dos mínimos quadrados, determina-se os valores de a e b na equação (25).

A difusividade aparente K_a , definida como

$$K_a = \frac{1}{4} \frac{\sigma_{rc}^2}{t} \quad (25)$$

está relacionada com a escala de difusão ℓ , definida por

$$\ell = 3 \sigma_{rc} \quad (26)$$

através de uma equação do tipo

$$K_a = \alpha \ell^\beta \quad (27)$$

Os coeficientes α e β são calculados representando $\log K = f(\ell)$ e ajustando-se a reta pelo método dos mínimos quadrados.

IV – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os dados experimentais de difusão turbulenta na Baía de Santos foram obtidos a partir do lançamento ao mar de uma fonte puntiforme e instantânea de ^{82}Br e medições da variação no tempo da concentração deste isótopo radioativo, à medida que a mancha originada se difunde por misturação oceânica.

IV.1 – Lançamento da Solução Radioativa de $\text{NH}_4^{82}\text{Br}$

Em cada campanha, injetou-se aproximadamente 1 curie de $\text{NH}_4^{82}\text{Br}$ diluído em 5 litros de água doce, onde se acrescentou também, como corante, rodamina B, para facilitar a

localização visual da mancha e orientar seu cruzamento pelo barco nos primeiros momentos. O injetor encontra-se instalado na popa do barco e a injeção se realiza abrindo a válvula de saída do injetor, por um sistema mecânico controlado à distância. O tempo de injeção é de 5 segundos, podendo, para efeitos práticos, ser considerado injeção instantânea. A mancha inicial, em alguns casos, não resulta ser exatamente puntiforme, devido a fatores como a deriva do barco pela ação do vento. Como o tempo de injeção é pequeno, este fator pode ser considerado desprezível. Quando se forma a mancha inicial, lança-se, aproximadamente no seu centro, um corpo à deriva que serve como indicador visual para facilitar posteriores localizações da mancha, já que o corante se dilui rapidamente.

A posição do ponto de injeção é determinada com o auxílio de dois sextantes.

Dentro do injetor existe um recipiente que coleta pequeno volume da solução radioativa injetada e que é analisado em laboratório para determinar-se a atividade total injetada no ponto de lançamento.

Após a injeção, o barco afasta-se lentamente para não perturbar o deslocamento da mancha. Distante do ponto de lançamento, lava-se o injetor para que a radioatividade residual retida nas suas paredes não influa nas medições posteriores.

IV.2 – Determinação da Direção do Deslocamento da Mancha Radioativa

Decorridos cerca de 40 minutos do lançamento, o barco aproxima-se do corpo à deriva que está no centro da mancha e, por meio dos detetores de radiação, localiza-se a zona de máxima atividade. Neste local, determina-se novamente a posição do barco. Desenhando-se em um mapa da Baía de Santos os dois pontos de lançamento e o de máxima atividade, pode-se estabelecer a direção da corrente e planejar as trajetórias do barco para os cruzamentos posteriores da mancha. Este procedimento é repetido para cada mancha.

IV.3 – Medição da Radioatividade

A atividade da mancha começa a ser medida no seu extremo mais afastado do ponto de lançamento; no início e fim de cada trajetória determina-se a posição do barco e o horário respectivo. A atividade acumulada é registrada a cada 15 segundos, em uma unidade digital. O intervalo de tempo entre o fim de uma medição e o início da consecutiva, é de 200 mili-segundos. Um registrador gráfico RUSTRAK registra a taxa de variação da radioatividade em cada segundo (cps). Terminada uma trajetória, a direção do barco é alterada em 180°, começando-se nova trajetória paralela à primeira. Na região da mancha, onde se encontra a máxima atividade, as trajetórias devem ser bastante próximas uma das outras, aumentando-se a partir daí o espaçamento entre elas. O cruzamento continua até o instante em que não se deteta mais radioatividade, sendo anotado o horário do início e término da varredura da mancha, para facilitar o cálculo do decaimento radioativo e corrigir a posição do barco, tendo em conta a influência da corrente.

IV.4 -- Mapeamento das Trajetórias e Construção das Curvas de Isoatividade

Utilizando-se um estaciógrafo, representa-se em um mapa da Baía de Santos os pontos extremos das trajetórias descritas pelo barco durante o cruzamento de cada mancha. Cada

trajetória é corrigida para a posição correspondente ao instante médio de cruzamento da mancha. Para isto utiliza-se o vetor velocidade da corrente e o Δt calculado, considerando-se o horário de cada extremo das trajetórias e o tempo médio de varredura da mancha. Estas são trasladadas, ocorrendo a posição que deveriam ter se todos os cruzamentos houvessem sido realizados no mesmo instante. Isto se traduz por uma expansão das trajetórias, sendo a ordem de grandeza do deslocamento proporcional a Δt , relativo ao tempo médio.

Em cada trajetória, a unidade digital registra p pontos de atividade e, portanto, considerando-se constante a velocidade de deslocamento do barco durante uma trajetória, a mesma é dividida em $(p - 1)$ intervalos iguais. A cada ponto corresponde uma determinada atividade líquida, já corrigida da influência do decaimento radioativo e radiação de fundo. Ligando-se os pontos de mesma atividade, obtêm-se as curvas de isoatividades. As curvas obtidas estão representadas nas figuras 1 a 7.

V – ANÁLISE DE DADOS

Para o cálculo dos parâmetros de difusão turbulenta em cada campanha, transforma-se cada mancha radioativa em outra equivalente, radialmente simétrica. Para isto, determina-se, por planimetria, a área total dentro de cada curva de isoatividade e calcula-se o raio que corresponde a uma mancha circular de igual área (raio equivalente, r_e).

Constroem-se curvas de correlação de $\log S(t, r_e) = f(r_e^2)$ que, extrapoladas para $r_e = 0$, permitem o cálculo de $S(t, 0)$. Se a distribuição de atividades for gaussiana, obtêm-se uma reta. Caso contrário, obtêm-se uma curva bem definida que permite extrapolação segura.

De posse dos valores de $S(t, 0)$, as equações (22) e (23) permitem o cálculo de m e σ_{rc} , respectivamente, utilizando o método dos mínimos quadrados. O coeficiente de correlação obtido para cada regressão foi sempre superior a 0,93.

Agrupou-se as campanhas, levando-se em conta as condições oceanográficas, em:

- a) condições de fortes correntes em que a mancha radioativa se dirige para fora da Baía de Santos (campanhas de 02 e 16-06-72);
- b) condições de fracas correntes em que a mancha, depois de caminhar certo tempo em direção ao alto mar sob influência de inversão de maré e ventos, sofre um giro, retornando para dentro da baía (campanhas de 12-05-72 e 23-06-72).

Existem duas (2) campanhas (05-05-72 e 09-06-72) em que as manchas radioativas, nas suas fases iniciais de difusão, sofreram perturbações ao serem atravessadas por uma draga de grande calado que trabalhava nesta zona. Os dados obtidos nestas campanhas estão dispostos nas figuras 15 e 16. Observa-se que o comportamento das mesmas é similar ao das manchas estudadas nas campanhas onde não houve perturbação. As retas obtidas são paralelas às demais, sendo a translação atribuída à perturbação inicial. No cálculo do coeficiente de difusividade aparente K_a , não foram computados os dados obtidos nas campanhas onde houve perturbação da mancha.

Durante a campanha de 15-09-72 houve uma violenta tempestade com vento forte e nestas condições a mancha radioativa dirigiu-se velozmente para a região da Ponta do Itaipu,

caminhando no sentido paralelo à Praia Grande. Sob efeito da tempestade, o barco adernava muito, tornando impossível o trabalho do pessoal. Ademais, a forte chuva e as ondas violentas que varriam a popa do barco impediram que os instrumentos pudessem ser utilizados até o fim da campanha. Nesta campanha, os dados coletados foram considerados insuficientes para o cálculo dos parâmetros de difusão.

VI – RESULTADOS

VI.1 – Cálculo dos Fatores de Diluição Física

A partir dos dados coletados em todas as campanhas, foi possível calcular o fator de diluição física (C_0/C_t) das manchas utilizando-se a equação (14) e considerando-se lançamentos puntiformes e contínuos. As curvas de isodiluição estão representadas nas figuras 8 a 14. Os detalhes das seções utilizadas no cálculo dos fatores de redução (C_t/C_0) estão representados nas figuras 15 a 21.

VI.2 – Leis de Difusão

Nos casos em que a mancha se dirigiu para fora da baía e não sofreu perturbação, calculou-se a relação entre a variância σ_{rc}^2 e o tempo de difusão. Utilizando-se ajuste das curvas pelo método dos mínimos quadrados, encontrou-se

$$\sigma_{rc}^2 = 0,04 t^{2,26} \quad (\text{figura 22})$$

Nas condições em que a mancha se dirige de volta para o interior da baía, a lei obtida foi:

$$\sigma_{rc}^2 = 334 t^{1,44} \quad (\text{figura 23})$$

Em ambos os casos, o expoente de t é superior à unidade, demonstrando que a lei de FICK não é adequada para explicar o fenômeno de difusão turbulenta na Baía de Santos.

Utilizando-se a equação (25), calculou-se a difusividade aparente K_a para os dois tipos de comportamento da mancha radioativa e seu correlacionamento com a escala de difusão (equação 27).

Quando a mancha se dirige para fora da baía, a lei encontrada é

$$K_a = 0,011 \ell^{1,20} \quad (\text{figura 24})$$

Observa-se que o expoente de ℓ é definitivamente inferior a 4/3. Portanto, a lei de difusão oceânica dos 4/3 não foi experimentalmente comprovada nestes casos.

A lei obtida, para os casos em que a mancha retorna à baía, é:

$$K_a = 5,07 \ell^{0,64} \quad (\text{figura 25})$$

Nestas condições, notou-se que durante o giro de inversão do sentido da trajetória, as manchas aproximaram-se muito da costa (região da Ilha das Palmas). As condições de contorno

começam a se fazer sentir no fenômeno de difusão e a representação matemática do fenômeno torna-se mais complexa, não podendo ser expressa satisfatoriamente pelo tipo de equação anterior.

Na tabela VI.1 encontram-se os parâmetros de difusão calculados para todas as campanhas oceanográficas realizadas, baseados na teoria de OKUBO⁽⁷⁾.

VII – CONCLUSÕES

As experiências e estudos realizados permitiram avaliar os níveis de turbulência associados ao processo de mistura oceânica na Baía de Santos em diversas condições oceanográficas. Constatou-se que:

- a) as manchas que se dirigem baía afora apresentam níveis de turbulência comparáveis aos obtidos por outros pesquisadores, OKUBO⁽⁷⁾, em mar aberto.

A lei de variação do coeficiente de difusividade lateral aparente é bastante semelhante à preconizada por OKUBO, especialmente quanto ao expoente β , confirmando ser este inferior à lei dos 4/3. Quanto ao coeficiente α , obteve-se valor cerca de 4 vezes superior ao obtido por OKUBO.

Os resultados obtidos para a lei de difusão nos casos em que a mancha se dirige baía afora, mostraram que o comportamento de σ_{rc}^2 em função do tempo corresponde aos obtidos em outras investigações realizadas em mar aberto. Como o coeficiente de proporcionalidade obtido é superior ao apresentado por OKUBO, isto indica que a difusão na primeira parte da experiência é superior à esperada. Este resultado pode ser interpretado de várias maneiras. Uma delas é admitir que as condições de difusão na Baía de Santos não são iguais às que se obtiveram em mar aberto. Outra, seria considerar que o barco introduz uma pequena perturbação na mancha, mesmo iniciando a varredura depois de transcorrida uma hora da injeção. Deve-se ressaltar que o barco utilizado é de pequeno tamanho e as manchas cruzadas com velocidade reduzida. Apesar destas precauções, pode ter ocorrido alguma perturbação inicial. A favor desta argumentação lembramos o ocorrido com duas campanhas, onde uma draga cortou a mancha. Nestes casos, a perturbação foi de grande magnitude, porém, pequena em duração. As curvas que correlacionam σ_{rc} e t, obtidas com dados destas campanhas, apresentaram um deslocamento paralelo e para cima, com respeito às curvas das campanhas não perturbadas. O parâmetro importante na equação de difusão é o expoente do tempo, isto é, a tangente à curva, representada em papel log-log. Mesmo nas campanhas perturbadas, este expoente se mantém.

- b) as experiências em que as correntes aproximaram-se da costa ou convergiram para o interior da baía, apresentaram resultados correspondentes a níveis de turbulência muito baixos. As condições de contorno que interferem no fenômeno parecem indicar a necessidade de novo formulismo matemático para explicar satisfatoriamente o problema.

TABELA VI.1

| Campanha | Mancha n.º | t(seg) | σ_{rc}^2 (cm ²) | σ_{rc} (cm) | K_a (cm ² /seg) | l (cm) |
|-----------------|------------|--------|------------------------------------|--------------------|------------------------------|-------------------|
| 05/05/72 (*) | I | 6.240 | $1,4 \times 10^5$ | $1,2 \times 10^4$ | 5.608 | $3,6 \times 10^4$ |
| | II | 15.000 | $1,3 \times 10^9$ | $3,6 \times 10^4$ | 21.670 | $1,1 \times 10^5$ |
| 12/05/72 | I | 6.060 | $8,0 \times 10^7$ | $8,9 \times 10^3$ | 3.300 | $2,7 \times 10^4$ |
| | II | 15.780 | $3,6 \times 10^5$ | $1,9 \times 10^4$ | 5.703 | $5,7 \times 10^4$ |
| 02/06/72 | I | 3.780 | $1,2 \times 10^7$ | $3,5 \times 10^3$ | 793 | $1,0 \times 10^4$ |
| | II | 5.640 | $4,0 \times 10^7$ | $6,3 \times 10^3$ | 1.173 | $1,9 \times 10^4$ |
| | III | 7.440 | $5,1 \times 10^5$ | $7,1 \times 10^3$ | 1.713 | $2,1 \times 10^4$ |
| | IV | 19.080 | $3,3 \times 10^5$ | $1,8 \times 10^4$ | 4.324 | $5,5 \times 10^4$ |
| 09/06/72 (*) | I | 8.368 | $3,5 \times 10^5$ | $1,9 \times 10^4$ | 10.454 | $5,6 \times 10^4$ |
| | II | 17.118 | $6,9 \times 10^5$ | $2,6 \times 10^4$ | 10.077 | $7,8 \times 10^4$ |
| | III | 24.827 | $2,6 \times 10^9$ | $5,1 \times 10^4$ | 26.178 | $1,5 \times 10^5$ |
| 16/06/72 | I | 3.639 | $9,9 \times 10^6$ | $3,1 \times 10^3$ | 678 | $9,4 \times 10^3$ |
| | II | 8.400 | $6,7 \times 10^7$ | $8,2 \times 10^3$ | 1.994 | $2,4 \times 10^4$ |
| | III | 19.380 | $9,6 \times 10^5$ | $3,1 \times 10^4$ | 12.384 | $9,2 \times 10^4$ |
| 23/06/72 | I | 4.620 | $6,4 \times 10^7$ | $8,0 \times 10^3$ | 3.463 | $2,4 \times 10^4$ |
| | II | 10.140 | $2,6 \times 10^5$ | $1,6 \times 10^4$ | 6.410 | $4,8 \times 10^4$ |
| | III | 26.040 | $7,2 \times 10^5$ | $2,7 \times 10^4$ | 6.930 | $8,1 \times 10^4$ |
| 15/09/72 | I | 4.020 | $1,0 \times 10^7$ | $3,1 \times 10^3$ | 622 | $9,5 \times 10^3$ |
| | II | 8.460 | $2,6 \times 10^6$ | $1,6 \times 10^4$ | 7.683 | $4,8 \times 10^4$ |

$$K_a = \frac{1}{4} \frac{\sigma_{rc}^2}{t} \quad (\text{difusividade aparente})$$

$$l = 3 \sigma_{rc} \quad (\text{escala de difusão})$$

$$\sigma_{rc}^2(t) = \frac{\int_0^{\infty} r_e^2 S(t, r_e) 2\pi r_e dr_e}{\int_0^{\infty} S 2\pi r_c dr_e}$$

(*) **Observação:** Nestas campanhas houve grande perturbação provocada pela passagem de uma draga de grande calado, que cortou as manchas na sua fase inicial. Estes dados não foram utilizados nos cálculos dos parâmetros de difusão.

ABSTRACT

The objectives of this work were to determine the laws that govern the phenomena of dilution and turbulent diffusion of a radioactive substance, injected as a point source, instantaneously in Santos Bay, taking into account the distinct oceanographic conditions. While the radioactive "cloud" formed is carried out by the current and dispersed by the water turbulence, its configuration is modified. In each experiment it was confirmed that the size of the radioactive tracer's cloud measured by its variance, σ_{rc} , is related to the time interval elapsed since the injection. This relation is a function of the oceanographic conditions. The analysis of the experimental data was based on the diffusion theory proposed by OKUBO.

RÉSUMÉ

Les objectifs de ce travail ont été déterminés par les lois qui gouvernent les phénomènes de la dilution et de la diffusion turbulente d'une substance radioactif, injectée comme une source ponctuelle et instantanée dans la Baie de Santos, levant compte des conditions océanographiques distinctes. A mesure que le nuage radioactif formé est traîné par le courant et dispersé par le mouvement turbulent, sa configuration se modifie. Dans chaque expérience on a confirmé que la grandeur du nuage du traceur radioactif, mesurée par sa variance σ_{rc} , garde une relation de dépendance avec l'intervale de temps passé depuis l'injection et que cette relation est une fonction des conditions océanographiques, l'analyse des données expérimentales a été basée sur la théorie de diffusion proposée par OKUBO.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) – GARCIA OCCHIPINTI, A., "Estudos Preliminares Necessários à Disposição Oceânica de Esgotos", Tese de Doutorado – São Carlos, 1970.
- (2) – OKUBO, A., "Horizontal Diffusion from an Instantaneous Point Source Due to Oceanic Turbulence", tec. rep. 32, NYO 8104, Chesapeake Bay Institute, 1962.
- (3) – BROOKS, N.H., 1960 "Diffusion of Sewage Effluent in an Ocean Current, Waste Disposal in the Marine Environment, Pergamon Press, 246-67.
- (4) – HAREMOES, P., "Tracer Investigations of Effluent Dispersion" – Radioisotope Tracers in Industry and Geophysics, IAEA, Vienna (1967), 207.
- (5) – HAREMOES, P., "Prediction of Pollution from Planned Sewage Outfall", J. Wat. Pollut. Control, Fed 38,8 (1966), 1323.
- (6) – OKUBO, A., "A Review of Theoretical Models for Turbulent Diffusion in the Sea", J. Ocean Soc. Japan, 20 (1962), 286.
- (7) – OKUBO, A., "A New Set of Oceanic Diffusion Diagrams" – Tec. Rep. 38, Chesapeake Bay Institute, 1968.
- (8) – ICHIYE, T., "A Note on Horizontal Diffusion of Dye in the Ocean", J. Ocean. Soc. Japan, 15, 171-176.
- (9) – OKUBO, A., "Longitudinal Dispersion in Non Uniform Flow", Tec. Rep. 68, Chesapeake Bay Institute, 1970.
- (10) – CEDERWALL, K., "Hidraulics of Marine Waste Water Disposal, Report. 42, 1968, Chalmers Institute of Technology, Sweden.
- (11) – ITO, N., FUKUDA, M., "Small Scale Horizontal Diffusion Near the Coast", Disposal of Radioactive Wastes into Seas, Oceans and Surface Waters, IAEA, Vienna, 1966, 471.



FIGURA 1



FIGURA 2



FIGURA 3

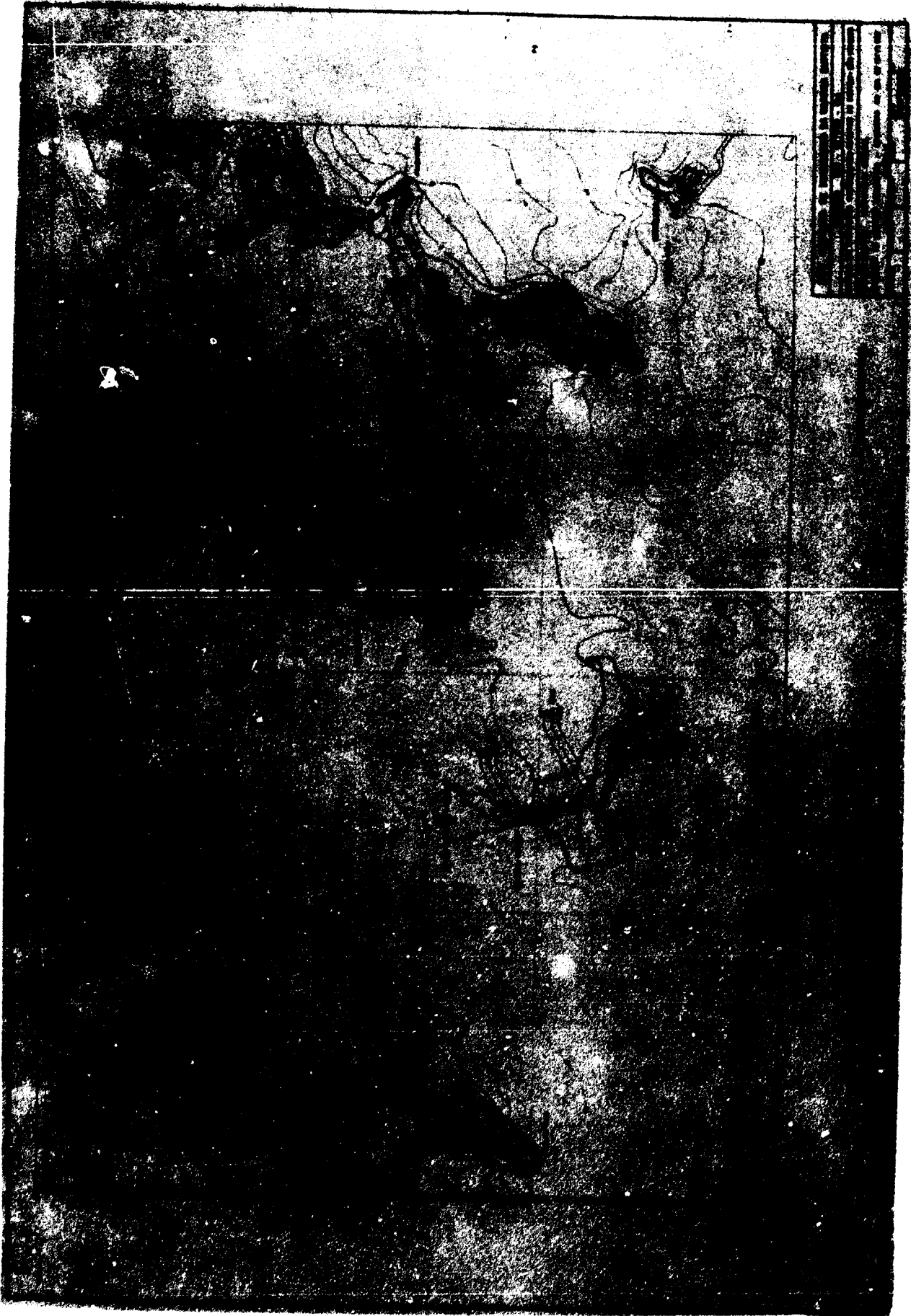


FIGURA 4

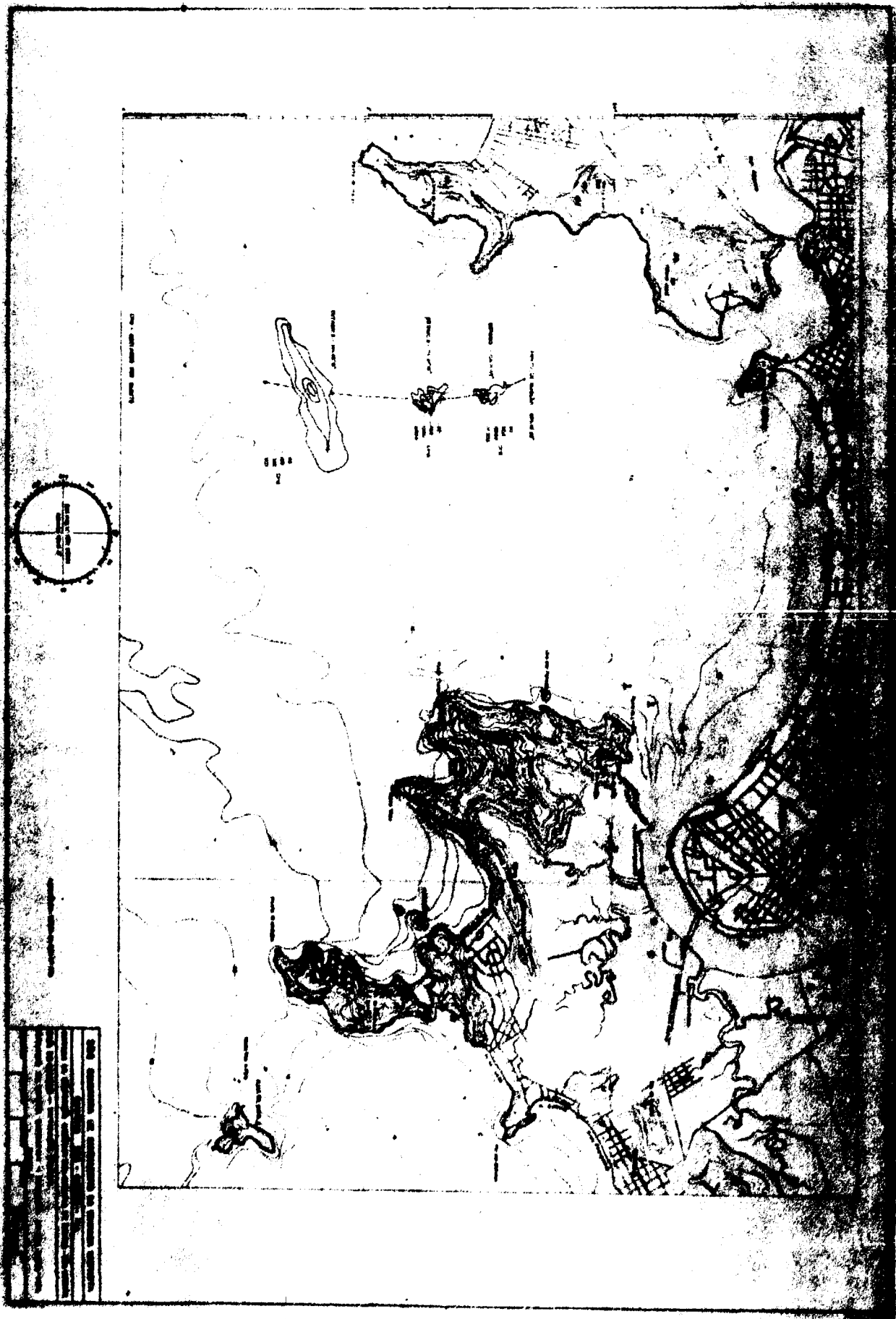


FIGURA 5



FIGURA 6

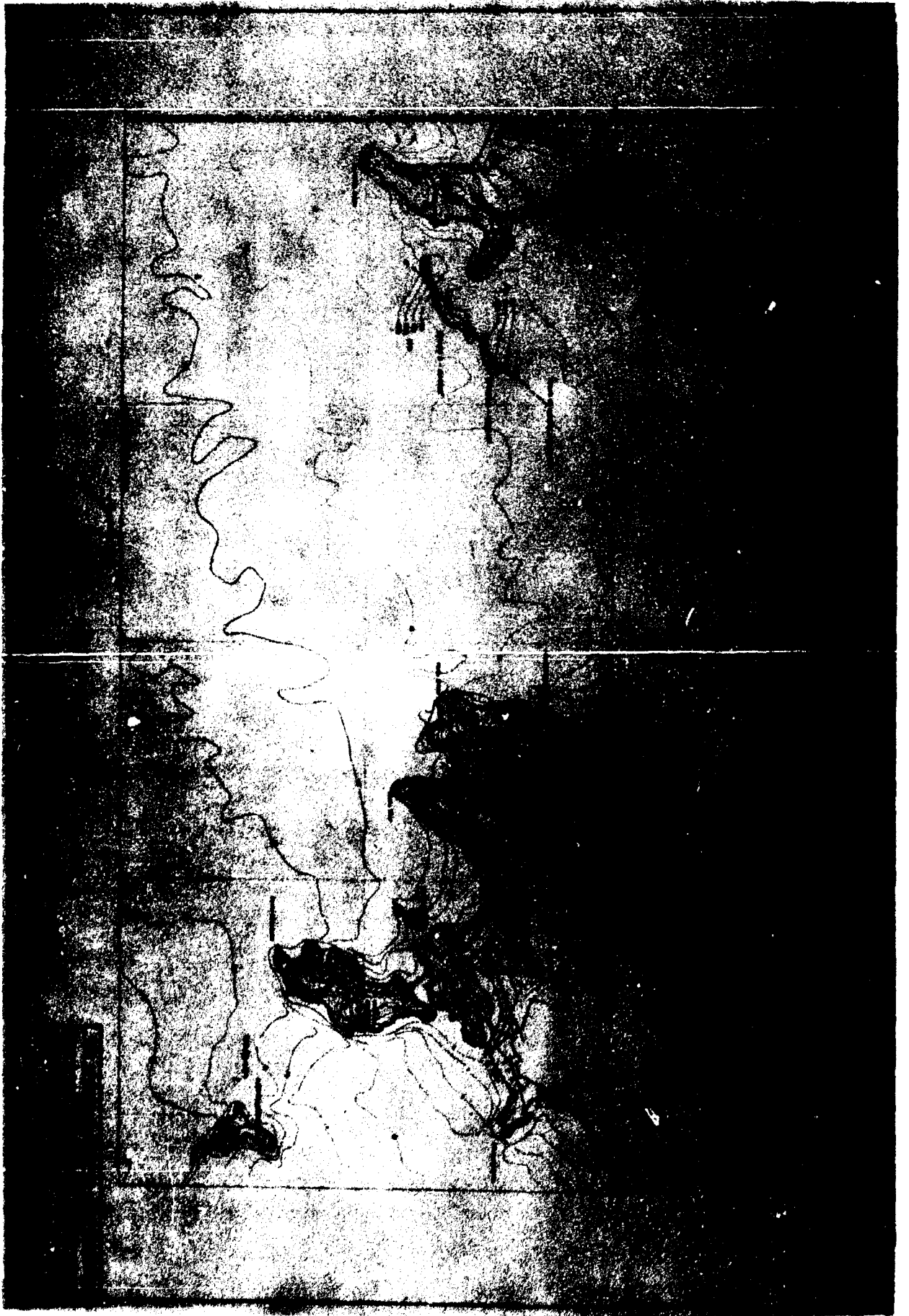


FIGURA 7



FIGURA 8

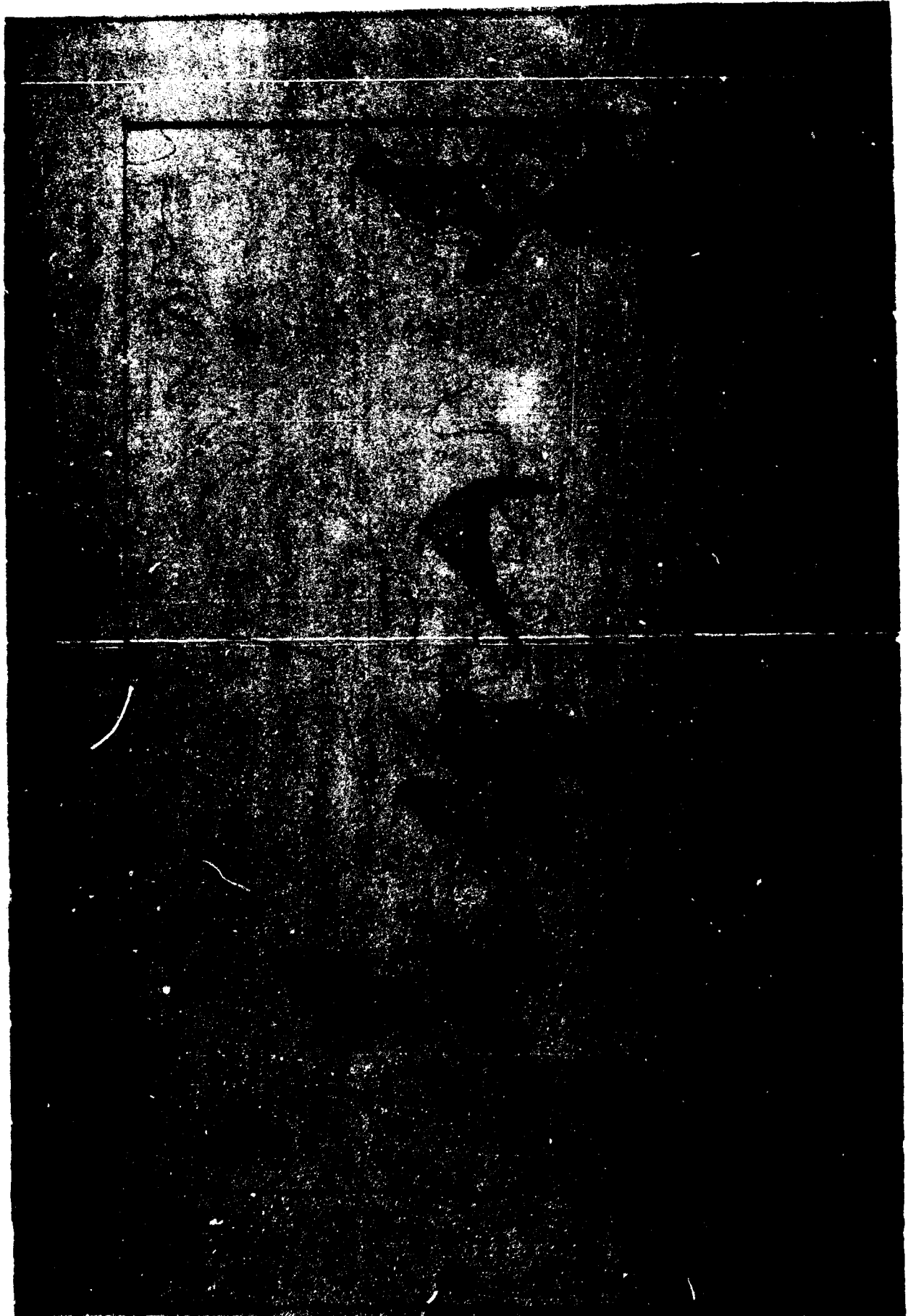


FIGURA 9



FIGURA 10

FIGURA 11





FIGURA 12

FIGURA 13

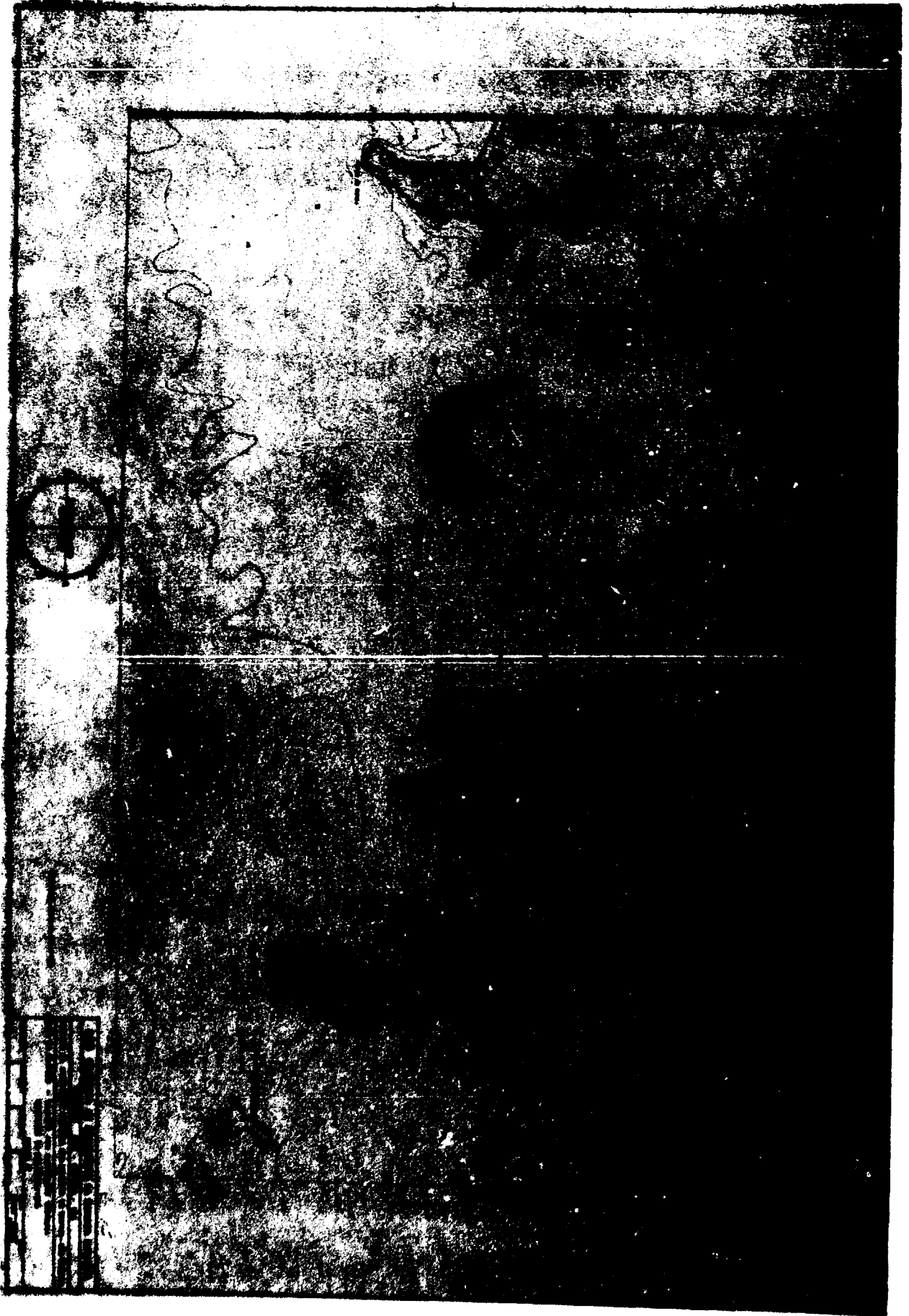




FIGURA 14

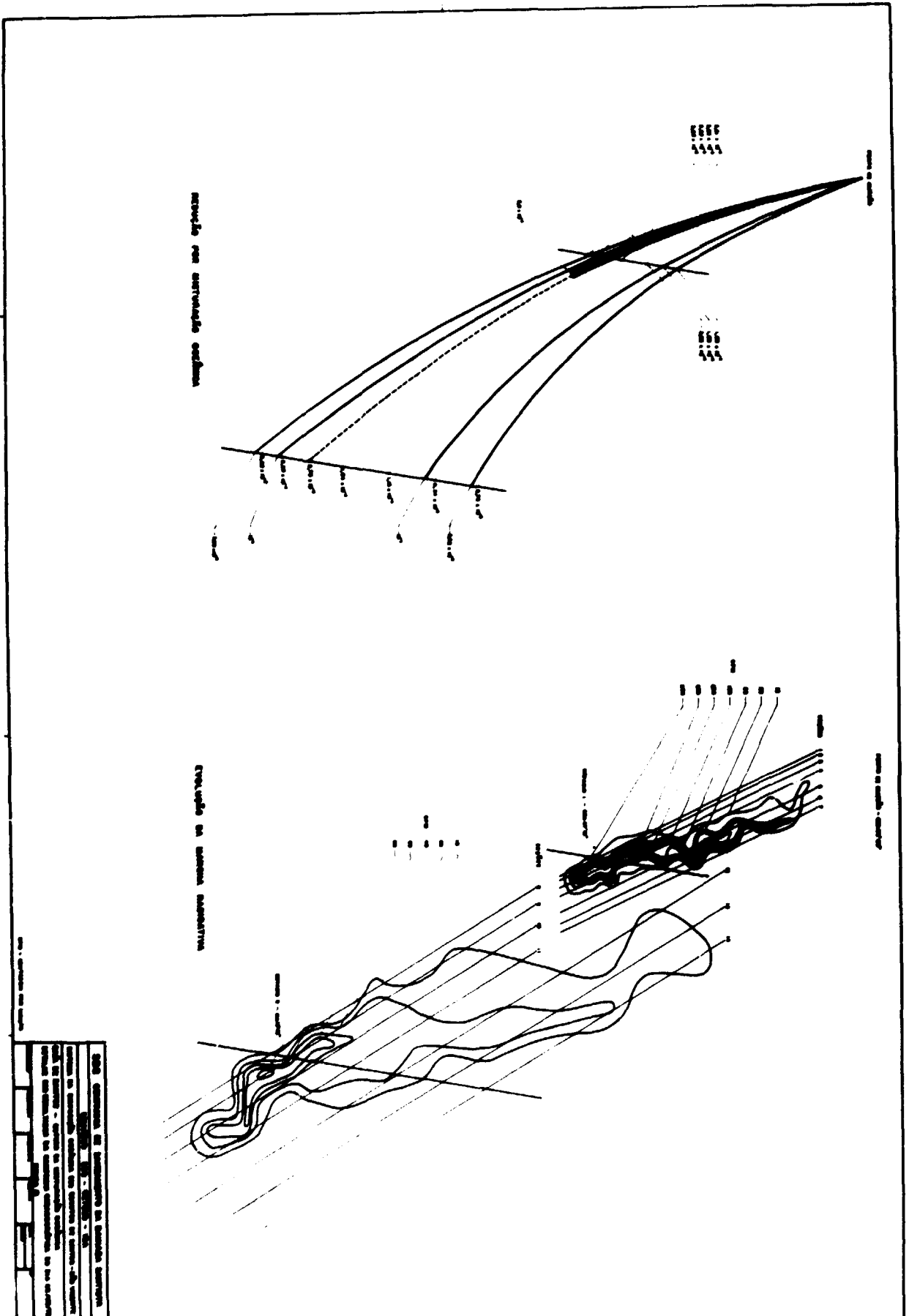


FIGURA 15

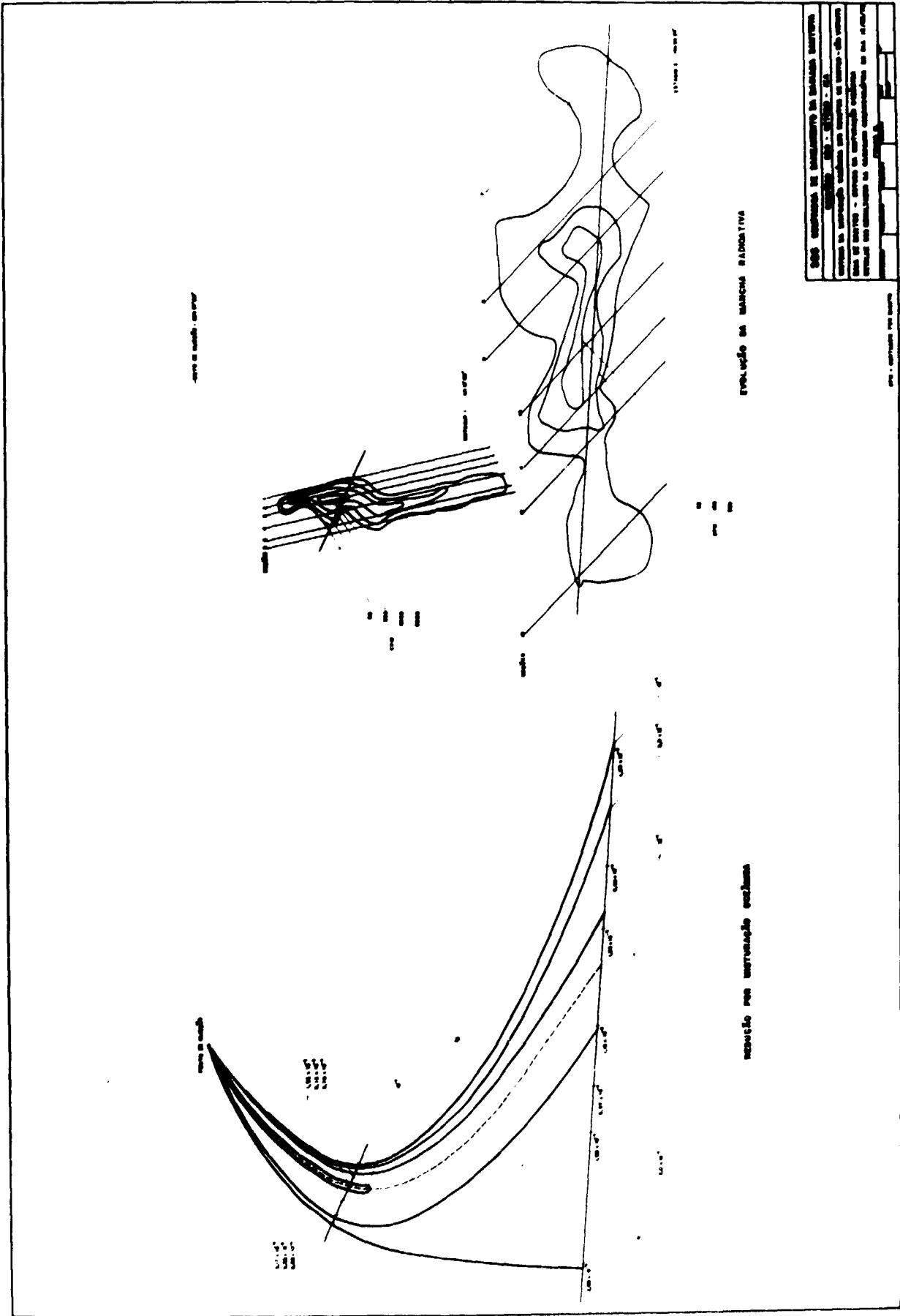


FIGURA 16

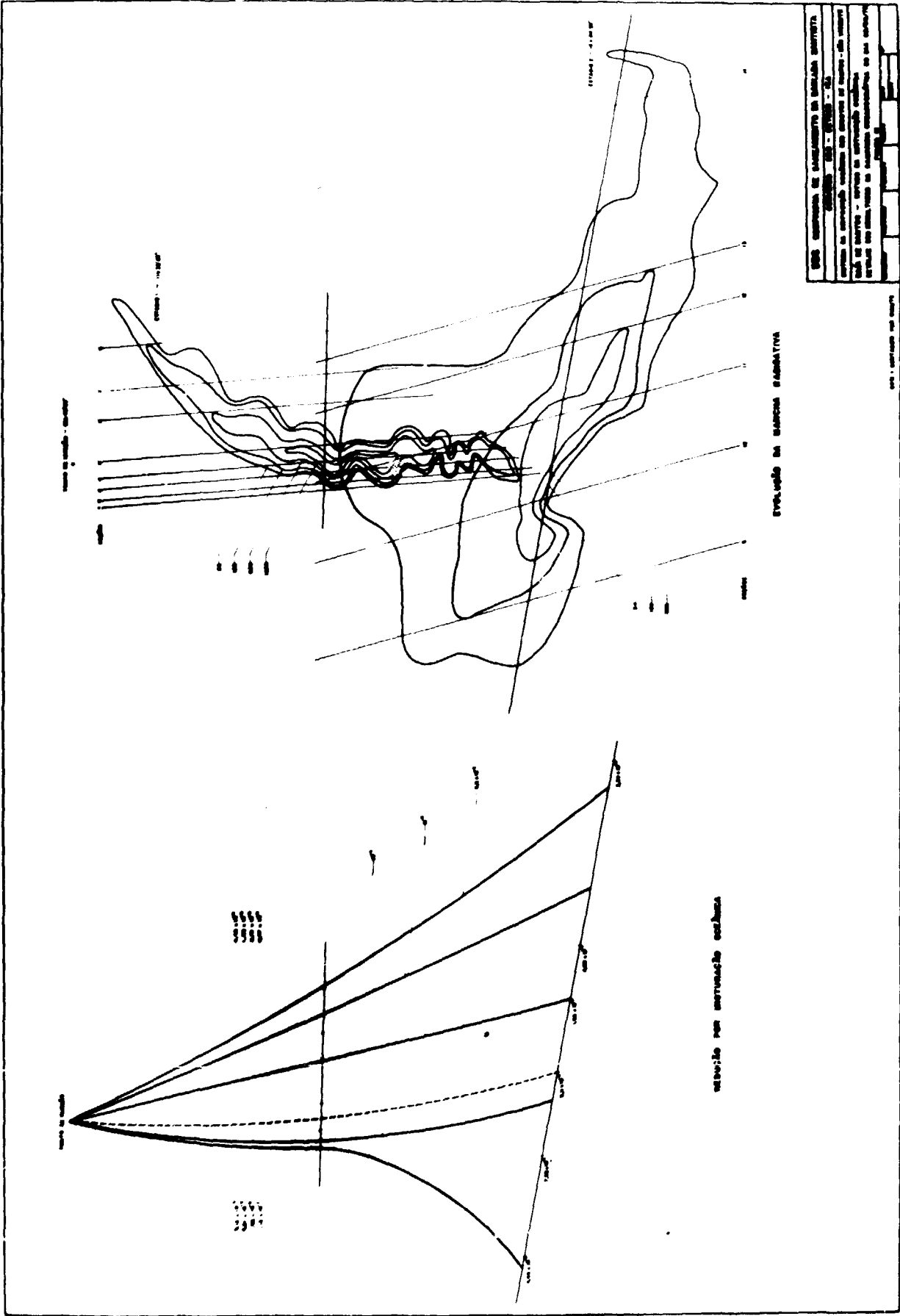


FIGURA 18

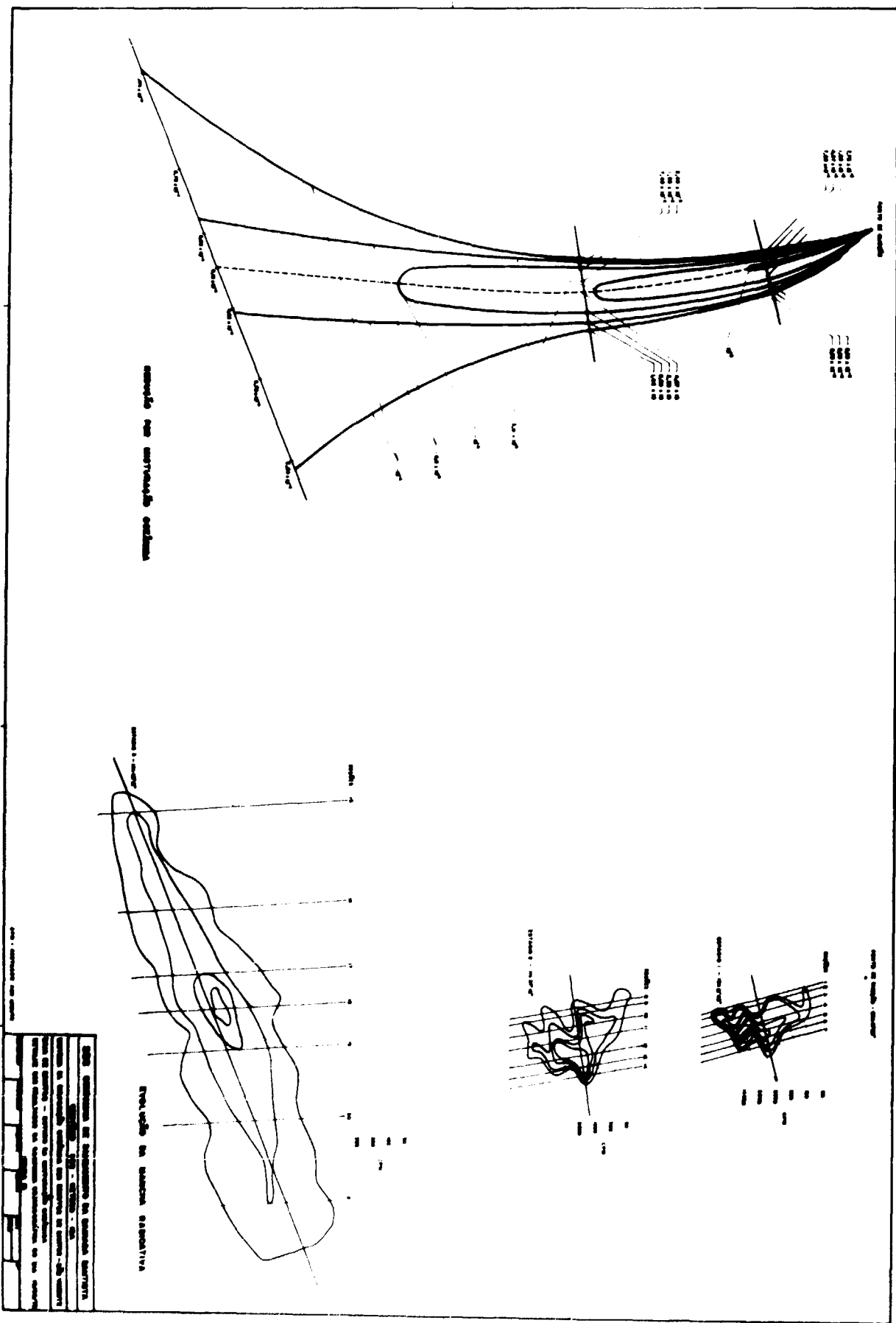


FIGURA 19

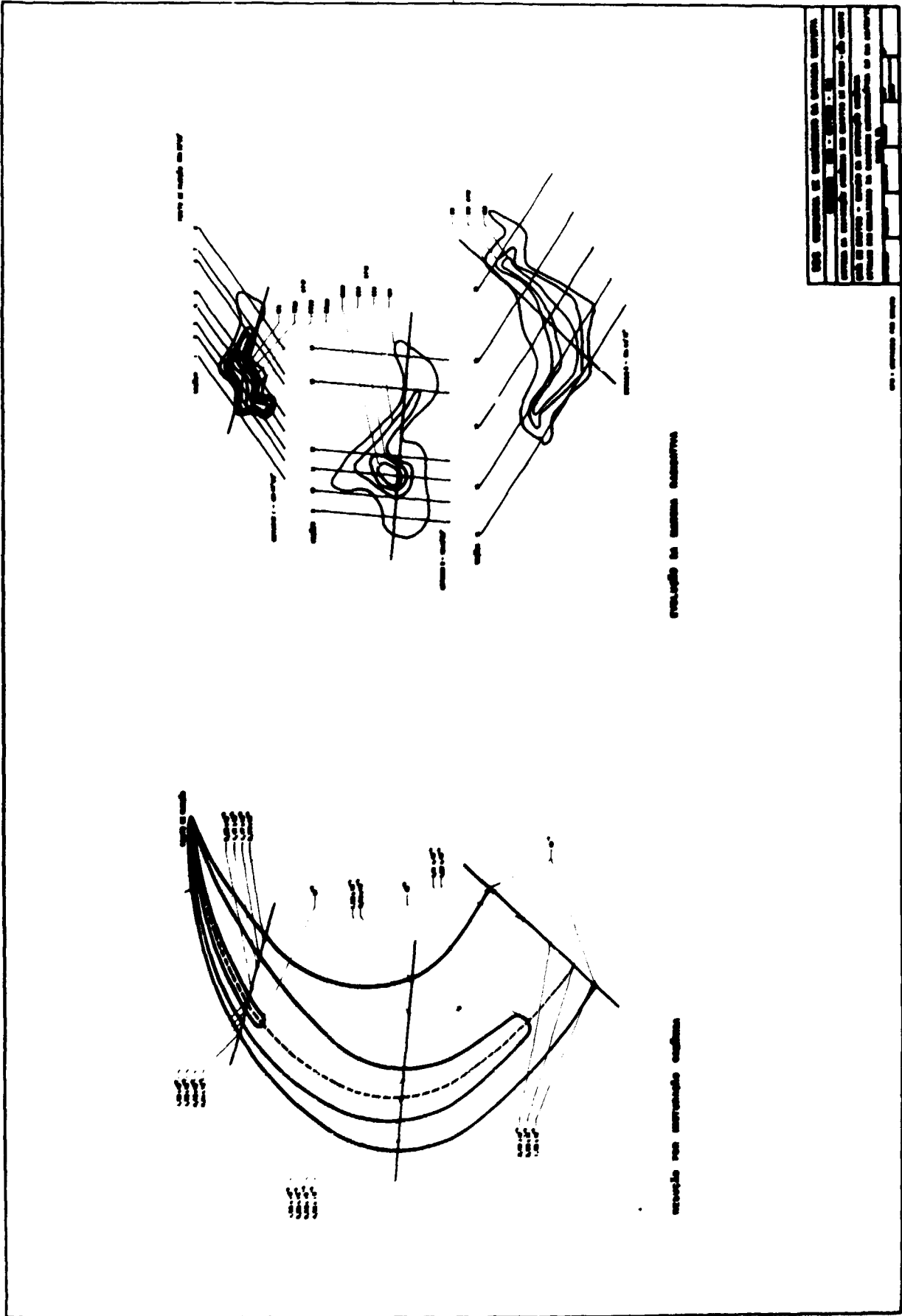


FIGURA 20

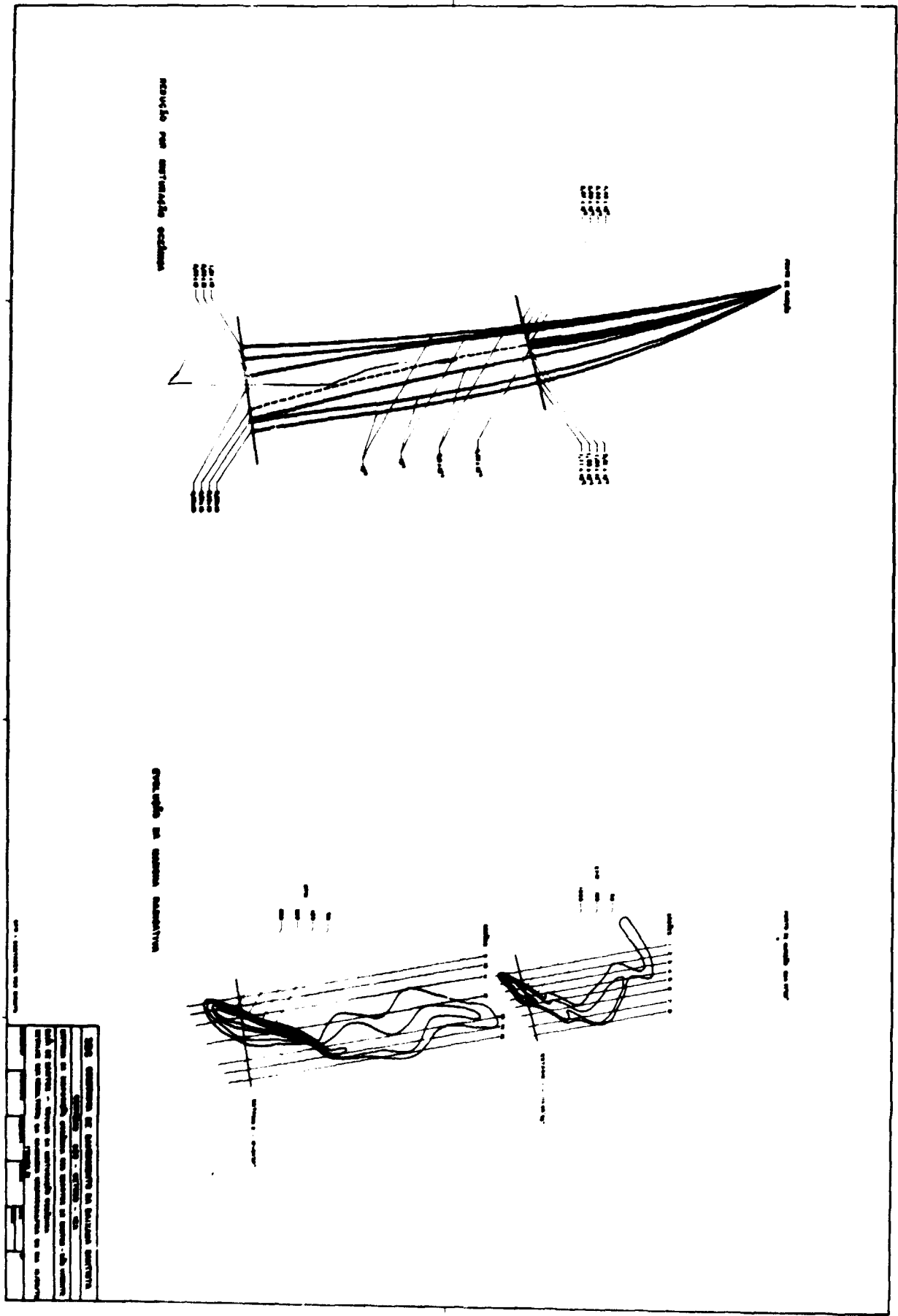


FIGURA 21

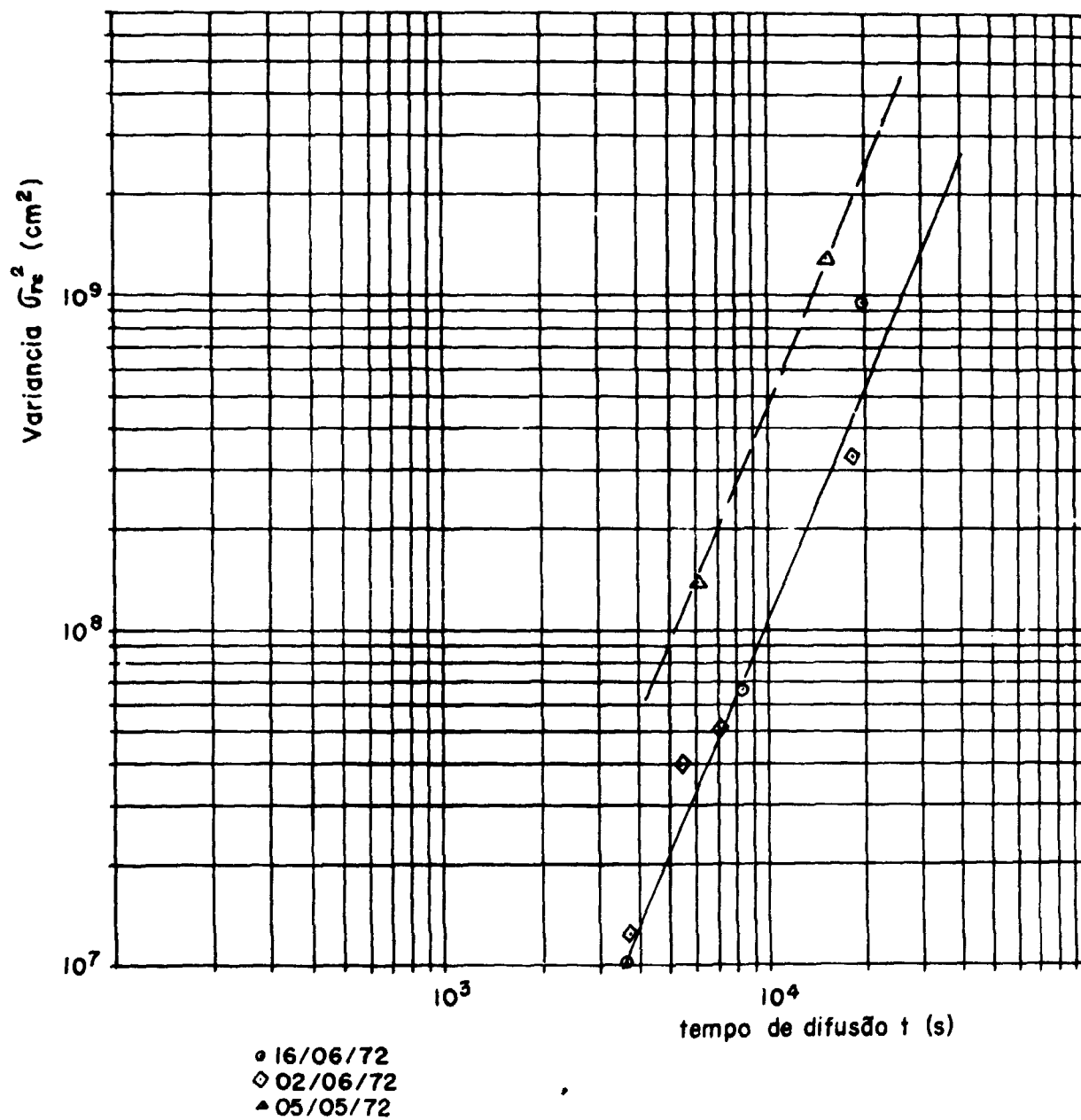


FIG. 22 - Condições: correntes fortes. As manchas se dirigem para fora da Baía.

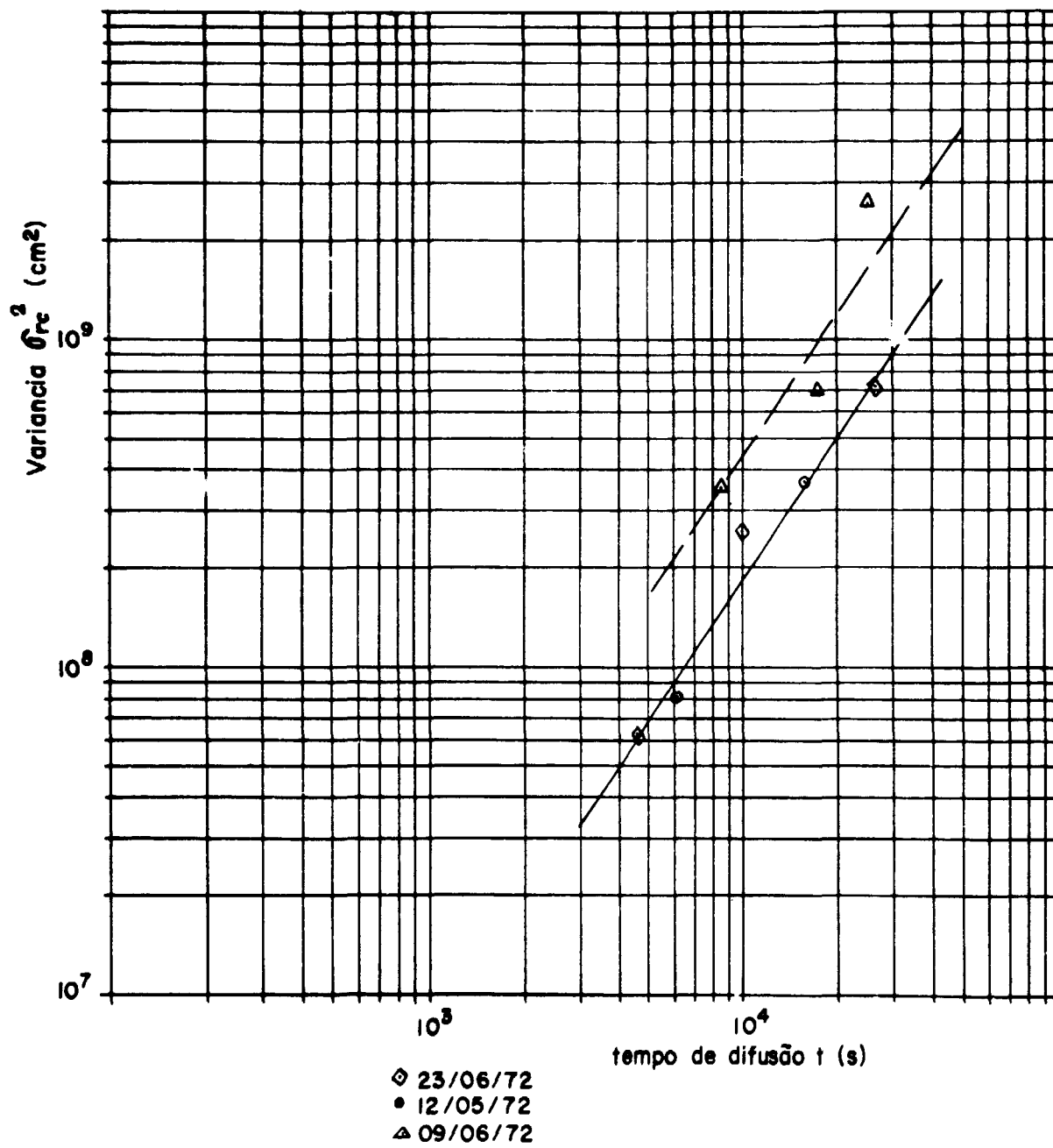


FIG. 23 — Condições: correntes fracas. As manchas se dirigem de volta para o interior da Baía.

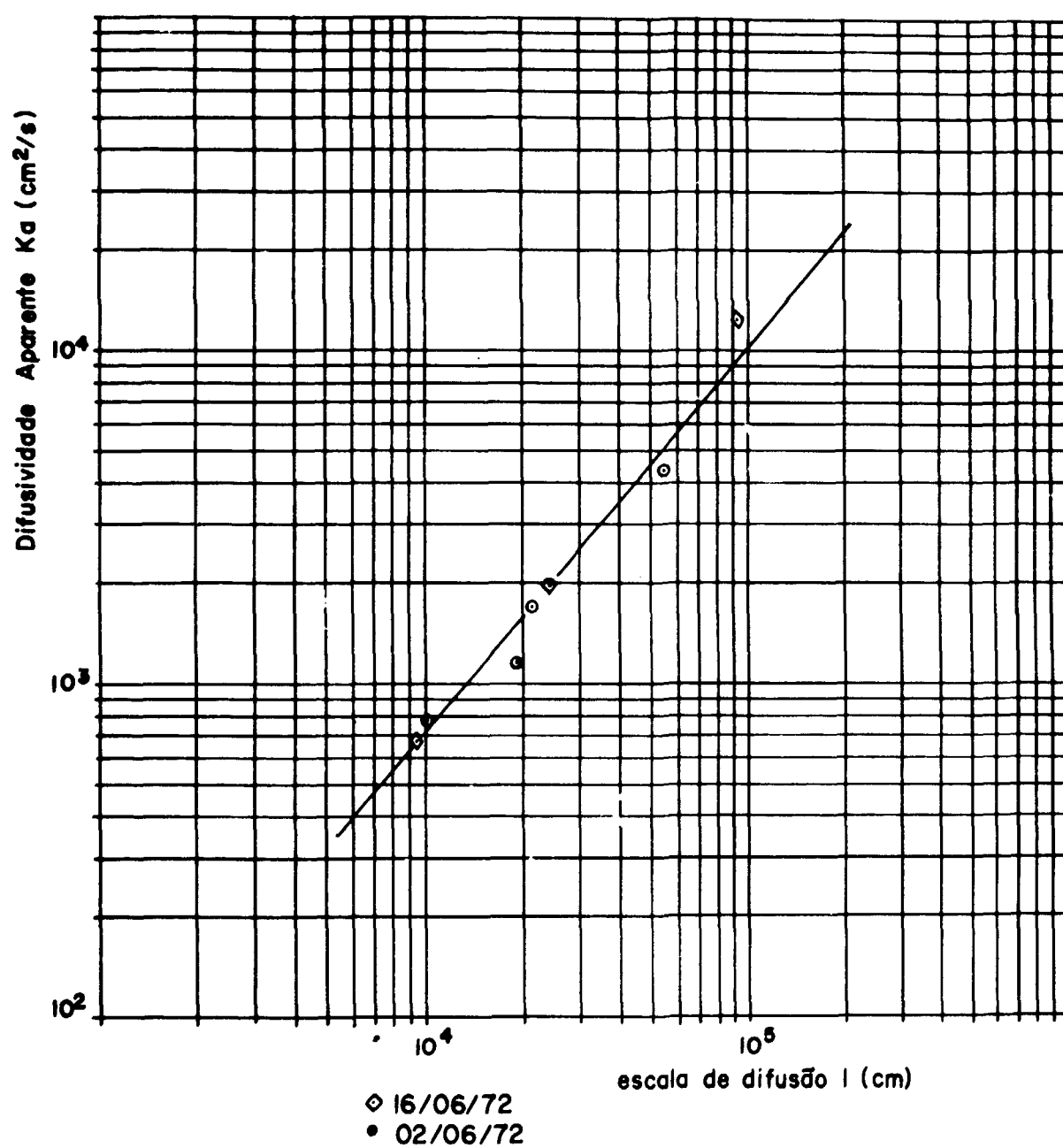


FIG. 24 - Condições: correntes fortes. A mancha radioativa se dirige para fora da Baía.

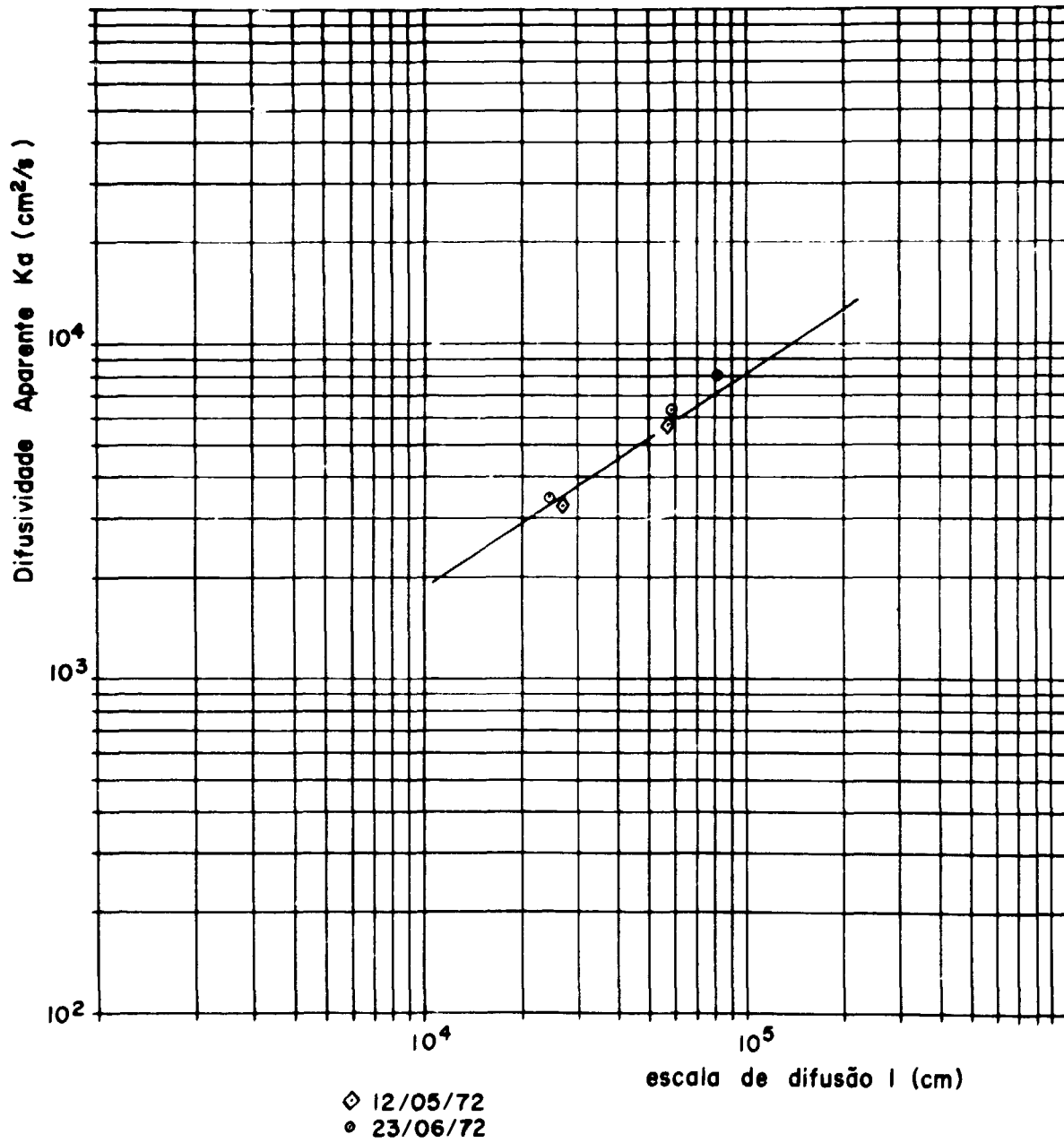


FIG. 25 — Condições: correntes fracas. A mancha radioativa se dirige para o interior da Baía.

