



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

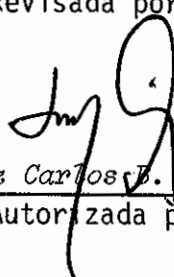
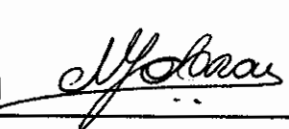
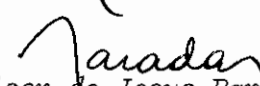
INPE-2193-TDL/060

Modelo numérico tridimensional para estimativa de concentração de poluentes.

Nelson Arai


Tese de Mestrado em Meteorologia, orientada por Nelson de Jesus Parada, aprovada em 12 de dezembro de 1980.

INPE
São José dos Campos
1980

1. Publicação nº <i>INPE-2193-TDL/060</i>	2. Versão	3. Data <i>Agosto, 1981</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DME</i>	Programa <i>RECAT</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>CONCENTRAÇÃO</i> <i>MODELO NUMÉRICO</i> <i>POLUENTE</i>			
7. C.D.U.: <i>551.510.42</i>			
8. Título <i>MODELO NUMÉRICO TRIDIMENSIONAL PARA ESTIMATIVA DE CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES</i>		10. Páginas: <i>87</i>	
		11. Última página: <i>C.4</i>	
9. Autoria <i>Nelson Arai</i>		12. Revisada por  <i>Luiz Carlos B. Molion</i>	
Assinatura responsável 		13. Autorizada por  <i>Nelson de Jesus Parada</i> Diretor	
14. Resumo/Notas <i>Utiliza-se um modelo numérico de dispersão em três dimensões para estudo da concentração de poluentes em uma determinada região, quando se têm velocidades de vento menores que 1 m/s. Utilizando dados meteorológicos disponíveis, o modelo calcula a distribuição tridimensional de concentração resultante da emissão de poluentes por uma fonte pontual contínua. Para velocidades de vento maiores que 1 m/s é usada a formulação da "Pluma Gaussiana". Os modelos são aplicados a região de Angra dos Reis. Os resultados obtidos indicam que esses modelos podem ser usados como uma primeira aproximação para estimativa de concentração.</i>			
15. Observações <i>Tese de Mestrado em Meteorologia, aprovada em 12 de dezembro de 1980.</i>			


Aproyada pela Banca Examinadora
em cumprimento dos requisitos exigidos
para a obtenção do Título de Mestre em
Meteorologia

Dr. Ralf Gielow



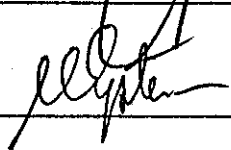
Presidente

Dr. Luiz Carlos Baldicero Molion



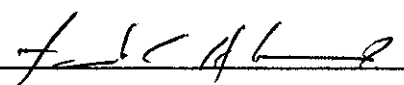
Orientador

Dr. Mario Epstein



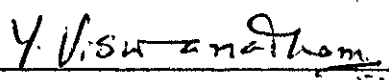
Membro da Banca
-convidado-

Dr. Fausto Carlos de Almeida




Membro da Banca

Dr. Y. Viswanadham



Membro da Banca

Nelson Arai



candîdato

São José dos Campos, 12 de dezembro de 1980

ÍNDICE

	<u>Pág.</u>
ABSTRACT	<i>iv</i>
LISTA DE FIGURAS	<i>v</i>
LISTA DE TABELAS	<i>vi</i>
LISTA DE SÍMBOLOS	<i>vii</i>
<u>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO</u>	1
1.1 - Características gerais do problema	4
<u>CAPÍTULO II - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</u>	7
2.1 - Modelo Gaussiano	7
2.2 - Parâmetros físicos para o Modelo Gaussiano	9
2.2.1 - Desvios padrões da distribuição de concentração	9
2.2.1.1 - Estimativa de σ_y	12
2.2.1.2 - Estimativa de z	14
2.3 - A formulação numérica	15
2.4 - Parâmetros físicos para o modelo numérico	24
2.4.1 - Campo do vento	24
2.4.2 - Coeficiente de difusividade turbulenta	26
2.4.3 - Coeficiente de difusividade turbulenta horizontal	30
2.4.4 - Estabilidade da atmosfera e altura da base da camada de inversão	30
<u>CAPÍTULO III - RESULTADOS</u>	31
<u>CAPÍTULO IV - COMENTÁRIOS E SUGESTÕES</u>	61
AGRADECIMENTOS	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
APÊNDICE A - CAMPOS DE CONCENTRAÇÃO USANDO A FORMULAÇÃO GAUSSIANA	
APÊNDICE B - CAMPOS DE CONCENTRAÇÃO USANDO O MODELO NUMÉRICO	
APÊNDICE C - FLUXOGRAMAS	

ABSTRACT

A three-dimensional numerical dispersion model is used to study the pollutant concentration in a region with wind velocities less than 1 m/s. Using currently available meteorological data, the model calculates the three-dimensional concentration distribution, resulting from emission of pollutants from a continuous point source. For wind velocities greater than 1 m/s the "Gaussian Plume" formulation is used. The models are applied to the region of Angra dos Reis. The results suggest that these models may be used as a first approximation to estimate pollutant concentration.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
I.1 - Região da Usina Nuclear de Angra dos Reis, com a localização do reator e das torres de coleta de dados	6
II.1 - Sistema coordenado que mostra a distribuição gaussiana ..	10
II.2 - Desvio padrão da distribuição horizontal da concentração em função da distância à fonte	13
II.3 - Desvio padrão da distribuição vertical de concentração em função da distância à fonte	15
II.4 - Sistema coordenado usado no modelo numérico e que mostra a região de Angra dos Reis e os espaços-grade	16
II.5 - Esquemas de diferenças finitas	19
III.1 - Campos de concentração estimada através do modelo gaussiano para condições de instabilidade	33
III.2 - Campos de concentração estimada através do modelo gaussiano para condições de neutralidade	37
III.3 - Campos de concentração estimada através do modelo gaussiano para condições de estabilidade	40
III.4 - Perfil assumido da altura da base da camada de inversão .	47
III.5 - Campos de concentração estimada através do modelo numérico após 1 hora de integração	50
III.6 - Campos de concentração estimada através do modelo numérico após 12 horas de integração	53
III.7 - Campos de concentração estimada através do modelo numérico após 24 horas de integração	56

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
I.1 - Parâmetros do "Homem-Padrão"	3
II.1 - Categorias de insolação	10
II.2 - Categorias de estabilidade	11
II.3 - Coeficientes de difusão	12
II.4 - Coeficientes de difusão	14
II.5 - Categorias de estabilidade	26
III.1 - Condições usadas na formulação gaussiana	32
III.2 - Índices permitidos pela AEC (Atomic Energy Commission) pa ra alguns radionuclídeos mais comuns no ar	44

LISTA DE SÍMBOLOS

- a_1, a_2 - coeficientes de difusão.
- b_1, b_2, b_3 - coeficientes de difusão.
- D_{xy} - operador de diferença finita para difusão horizontal.
- D_z - operador de diferença finita para difusão vertical.
- H - altura da base da camada de inversão (m).
- H^* - altura da cobertura vegetal (m).
- h - altura efetiva da fonte (m).
- i, j, k - Índices grade ao longo dos eixos x, y e z, respectivamente.
- \overleftrightarrow{K} - tensor difusividade turbulenta.
- K - coeficiente de difusividade turbulenta ($m^2 \cdot s^{-1}$).
- K_H - coeficiente de difusividade turbulenta horizontal ($m^2 \cdot s^{-1}$).
- K_N - coeficiente de difusividade turbulenta horizontal para condições de neutralidade ($m^2 \cdot s^{-1}$).
- K_S - coeficiente de difusividade turbulenta vertical a 10 m ($m^2 \cdot s^{-1}$).
- K_V - coeficiente de difusividade turbulenta vertical ($m^2 \cdot s^{-1}$).
- K_X - coeficiente de difusividade turbulenta segundo o eixo "x" ($m^2 \cdot s^{-1}$).
- k_0 - constante de von Kármán.
- L - comprimento de Monin-Obukhov (m).
- ℓ - comprimento de mistura (m).
- n - Índice do incremento de tempo.
- Q - poder de emissão da fonte ($Ci \cdot s^{-1}$).
- r_ϵ - distância da estação coletora de dados até ponto grade (m).
- $r_{m,n}$ - distância do ponto grade (i,j) até o ponto grade (m,n) (m).
- s - classe de estabilidade.

- t - tempo (s).
- u, v, w - operadores de diferença finita para advecção horizontal e vertical segundo os eixos x, y e z , respectivamente.
- \bar{u} - velocidade média do vento ($m \cdot s^{-1}$).
- u_ϵ, u_ϵ - componentes do vetor vento medidos na torre ϵ nas direções x e y , respectivamente.
- u_{ij}, v_{ij} - componentes do vetor vento na grade de análise nas direções x e y , respectivamente.
- u_{mn}, v_{mn} - componentes do vetor vento no campo inicial na grade de análise nas direções x e y , respectivamente.
- u_* - velocidade de fricção ($m \cdot s^{-1}$).
- \bar{V} - vetor vento médio ($m \cdot s^{-1}$).
- V_S - velocidade do vento a 10 metros ($m \cdot s^{-1}$).
- w - componente do vetor vento na grade de análise na direção z ($m \cdot s^{-1}$).
- x - coordenada oeste-leste (m).
- x' - coordenada horizontal (m).
- x_{max} - limite a este da área (m).
- y - coordenada sul-norte (m).
- y' - coordenada horizontal (m).
- y_{max} - limite ao norte da área (m).
- z - altura (m).
- z_0 - parâmetro de rugosidade da superfície (m).
- Δt - incremento de tempo (s)
- Δv - incremento de volume (m^3).
- $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ - lados da grade -volume nas direções x, y e z , respectivamente (m).
- λ - constante paramétrica.

- σ_y, σ_z - desvios padrões da distribuição lateral e vertical, respectivamente (m).
- ϕ_m - cisalhamento adimensional do vento.
- \bar{X} - concentração ($C_i \cdot m^{-3}$).
- X_0 - concentração inicial ($C_i \cdot m^{-3}$).

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O rápido aumento populacional experimentado pelo nosso planeta, nos últimos séculos, trouxe consigo um acréscimo equivalente na necessidade de novas fontes de energia. Paralelamente, cresceu também um outro problema: a poluição atmosférica. Num problema desta natureza, o fator primordial é a eficiência de difusão da atmosfera.

No estudo que foi desenvolvido, tentou-se avaliar até que ponto uma nova fonte geradora de energia - o reator nuclear - poderia influenciar a qualidade do ar onde esta será implantada. Foi estudada a difusão de resíduos atômicos - materiais radioativos liberados durante operações de rotina, ou devido a um acidente em uma usina nuclear, na atmosfera.

Inicialmente, deve-se conhecer alguma coisa sobre a obtenção desse tipo de energia e os possíveis efeitos que os seres humanos poderiam sofrer quando expostos à radiação. Como se sabe, a energia atômica é obtida através da fissão nuclear, isto é, por meio da desintegração controlada de átomos de elevado número atômico. Desta forma, o Urânio (número atômico 92) e o Plutônio (número atômico 94) transformam-se gradativamente em isótopos radioativos de elementos de números atômicos mais baixos. Um processo desta natureza libera grande quantidade de energia, principalmente energia térmica, a qual vai alimentar por exemplo uma usina elétrica.

O Urânio funciona, então, como "combustível" das centrais eletronucleares e, com a fissão do mesmo, o seu rendimento se torna mais baixo. Por isso, a cada dois ou três anos, são submetidos a um tratamento químico através do qual os elementos resultantes da desintegração são retirados. Este processo de recuperação do Urânio do reator implica a retirada do acúmulo de isótopos radioativos, altamente perigosos para seres vivos.

O Plutônio, obtido do Urânio através dos reatores atômicos, é um dos elementos mais perigosos, pois os seus isótopos penetram no organismo e se fixam nos ossos, provocando a sua cancerização em consequência dos efeitos da partícula alfa.

Os efeitos de uma dada dose de radiação dependem de um grande número de fatores, tais como a magnitude da dose absorvida, o tipo de radiação, o poder de penetração da radiação, radiosensibilidade do organismo, a razão na qual a dose é liberada, a porção irradiada do organismo, e o órgão específico envolvido.

Os aspectos qualitativos dos efeitos da radiação são bem conhecidos através de experiências com animais e de seres humanos expostos à radiação, mas a relação quantitativa entre a dose eliminada sob certas condições e as mudanças biológicas com respeito a seres humanos não é bem conhecida. Como cada indivíduo tem um organismo com uma resistência particular, a hipótese que se usa para avaliar os efeitos da radiação no organismo humano é a suposição de um "homem padrão". Portanto, as doses e os efeitos que serão citados dizem respeito a este "homem padrão". Os parâmetros selecionados no "homem padrão" são dados na Tabela I.1, extraída de Slade (1968).

Segundo Braestrup e Wickoff (1958), para este homem estima-se que a dose de raio-X ou radiação gama de 410 a 510 rads, cedida à maior parte do corpo em um pequeno intervalo de tempo, resultará na morte se o mesmo for exposto por um período de alguns meses (Slade, 1968). Doses entre 100 e 300 roentgens produzem náuseas, vômitos, hemorragia, diarreia e queda de cabelos (Eisenbud, 1973).

O aumento de incidência de certas enfermidades, devido à exposição, tem sido bastante documentada, tanto para animais como para seres humanos. Por exemplo, segundo Wald (1958), o aumento de incidência de leucemia sobre sobreviventes japoneses das detonações nucleares em Hiroshima e Nagasaki indicaram que a leucemia pode ser produzida por uma única exposição da ordem de 100 roentgens (Slade, 1968).

TABELA I.1

PARÂMETROS DO "HOMEM-PADRÃO"

PESO DE TODOS OS ÓRGÃOS DO CORPO	70000 g
ESQUELETO	
Osso sem tutano	7000 g
Tutano vermelho	1500 g
Tutano amarelo	1500 g
CONTEÚDO DO:	
Grande intestino inferior	150 g
Estômago	1100 g
Pequeno intestino	135 g
Grande intestino superior	1700 g
Fígado	1500 g
Pulmões	700 g
Rins	300 g
Baço	150 g
Testículos	30 g
Tiróide	20 g
ÁGUA TOMADA EM ALIMENTO E FLUÍDO	2200 g/dia
TOTAL DE AR INALADO POR DIA	2×10^7 cm ³

FONTE: Slade (1968), p. 325.

Além disso, a radiação é um dos agentes de mutação genética a qual o homem está exposto. Tais agentes podem produzir mudanças nas células genéticas, as quais, por sua vez, podem ser passadas para seus descendentes e, conseqüentemente, produzir anomalias nas gerações futuras (World Health Organization, 1957). Deve-se considerar, ainda, o fato de que o efeito da radiação persiste até a desintegração total dos isótopos, isto é, até a sua transformação em um elemento estável não-radioativo. Este processo é medido com relação ao tempo, denominando-se "meia-vida" de um isótopo o intervalo de tempo necessário para que haja

a transformação da metade de uma quantidade inicial de átomos radioativos. No organismo humano, a maioria dos elementos radioativos têm um tempo de residência de cento e vinte dias, exceto o plutônio e o tório, cujos tempos de residência são um e quatro anos, respectivamente (Slade, 1968).

Ao que se expôs anteriormente acrescenta-se o extremo cuidado que deve ser tomado no que se refere ao aproveitamento deste tipo de energia, tendo-se em vista os riscos que a sua utilização apresenta. E que se unam os esforços dos vários campos do conhecimento: Engenharia, Química, Meteorologia, Medicina e outros, para um entendimento mais profundo no que se refere à contaminação do ambiente, causada por este tipo de energia.

Neste trabalho, tenta-se dar uma contribuição à solução do problema no campo da Meteorologia. Para tanto, deve-se notar, inicialmente, a aplicação desta ciência em um estudo desta natureza. Ela se aplica ao campo da energia atômica em três fases razoavelmente distintas: durante a escolha do local, adaptação do desenho e operação de cada tipo especial de reator; durante operações de rotina; e na eventualidade de um acidente onde haja escape do material radioativo.

A escolha do local de construção de um reator não depende somente dos fatores que governam a localização de uma indústria convencional, tais como: disponibilidade de terra, água, mão-de-obra e mercado, mas também da densidade populacional e principalmente da capacidade da atmosfera local de difundir o poluente nela emitido.

1.1 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DO PROBLEMA

O problema da localização de um reator e dos riscos que a sua operação apresenta tem sido enfocado com bastante insistência por pesquisadores como Gifford (1961), Slade (1968), Start et alii (1976), e outros.

Especificamente para a região em estudo podem-se citar, entre outros, dois trabalhos: o primeiro desenvolvido por Simmons (1975) para a "Nuclear Utility Services (NUS) Corporation", a pedido de Furnas Centrais Elétricas S.A., que é a aplicação do modelo proposto por Start et alii (1975) e corrigido posteriormente por Tank (1976), que se baseia na equação da Pluma Gaussiana; e o segundo desenvolvido por Della Santina (1978) que faz a abordagem do problema sob o aspecto do "Máximo Acidente Crível" (MAC) que considera um acidente do tipo "Loss of Coolant Accident" (LOCA), e faz também uma análise com respeito a cálculos das distâncias de segurança para reatores baseados nas nove categorias de acidentes do relatório Rasmussen (1975).

No presente trabalho, foram utilizadas duas formulações para a estimativa da dispersão de poluentes na região de Angra dos Reis. A formulação gaussiana foi usada para condições de vento com velocidades superiores a 1 m/s, uma vez que, segundo Pasquill (1974), ela não fornece resultados consistentes para velocidades abaixo deste valor. Para velocidades abaixo de 1 m/s, utilizou-se uma técnica numérica baseada num modelo sugerido por Shir e Shieh (1974), que será apresentado em detalhes no Capítulo II. Os dados meteorológicos utilizados no estudo foram obtidos de 4 torres de observação localizadas na vizinhança do prédio do reator (Figura I.1), do Aeroporto do Galeão no Rio de Janeiro, e da estação de superfície da cidade de Angra dos Reis.

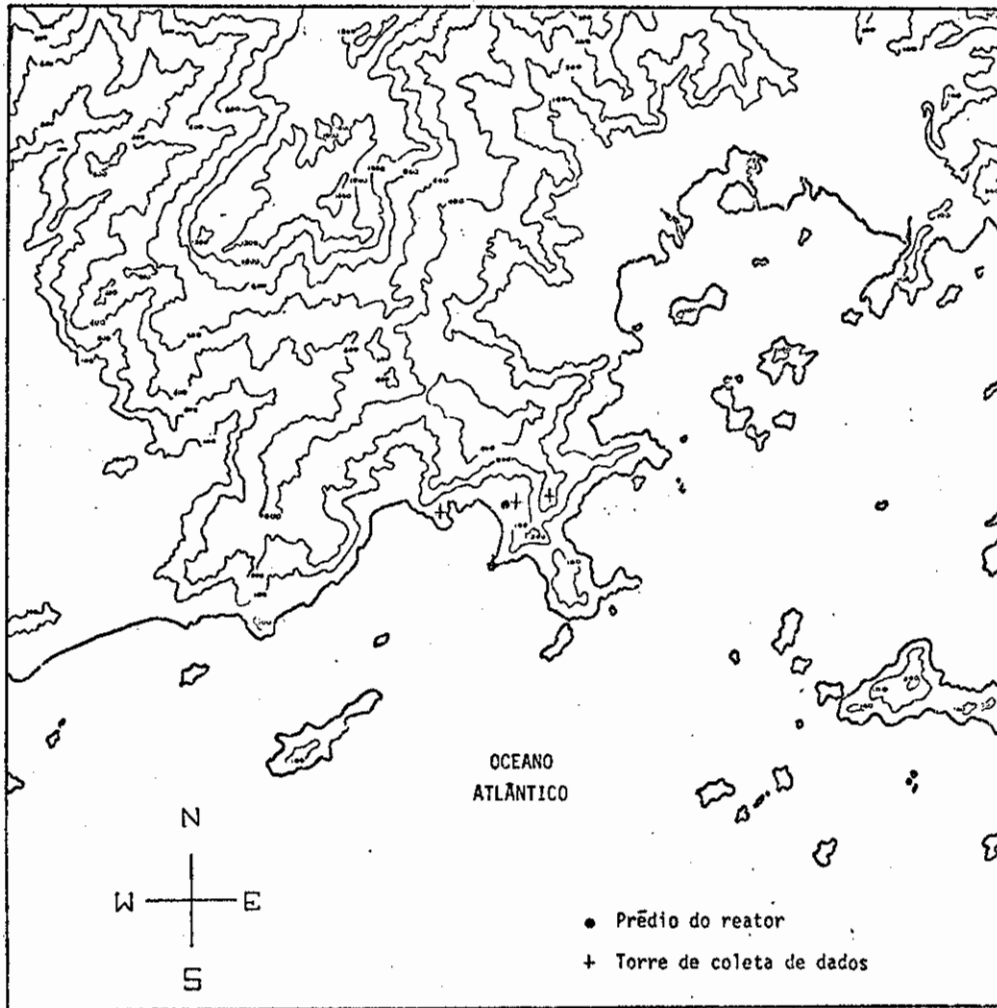


Fig. I.1 - Região da Usina Nuclear de Angra dos Reis, com a localização do reator e das torres de coleta de dados.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 - MODELO GAUSSIANO

Esse é um modelo largamente utilizado em problemas de dispersão, e baseia-se fundamentalmente na solução da equação de difusão.

Embora sujeito a algumas restrições, o modelo tem fornecido resultados que se aproximam bastante dos obtidos experimentalmente (Slade, 1968). Em estudo desenvolvido por Start et alii (1976), a utilização de parâmetros obtidos para terreno plano em terreno acidentado forneceu resultados considerados satisfatórios.

O ponto de partida para esse modelo é a equação geral do transporte de massa com geração que se apresenta sob a forma:

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \bar{X} = \nabla \cdot \vec{K} \cdot \nabla \bar{X} + Q \quad (\text{II.1})$$

onde:

\bar{X} - concentração média;

t - tempo;

\vec{K} - tensor difusividade turbulenta;

Q - poder de emissão da fonte;

\vec{V} - velocidade.

Considerando-se as condições:

1) regime permanente;

2) Q = CTE, poder de emissão constante;

- 3) nenhuma absorção ou geração pela superfície;
- 4) $u = \text{CTE}$, $v = w = 0$, ou seja, vento constante na direção x' ;
- 5) $H \rightarrow \infty$, ou seja, não existe altura de inversão;
- 6) dispersão vertical e horizontal que varia independentemente somente com a distância do ponto considerado à fonte, e acarreta a nulidade dos componentes não-diagonais de \overline{K} ;
- 7) dispersão desprezível ao longo da direção do vento;

a solução dessa equação é uma função de distribuição gaussiana (normal) e apresenta, para uma fonte pontual contínua de intensidade Q , localizada a uma dada altura da superfície (Figura II.1), considerando-se $\sigma_z^2 = 2K_{zz} \cdot t$ e $\sigma_y^2 = 2K_{yy} \cdot t$, a seguinte forma (Slade, 1968):

$$\overline{X}(x', y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \cdot e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \cdot \left\{ e^{-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}} \right\} \quad (\text{II.2})$$

onde:

- σ_y - desvio padrão da distribuição de concentração com relação ao eixo y ;
- σ_z - desvio padrão da distribuição de concentração com relação ao eixo z ;
- \bar{u} - velocidade média do vento;
- h - altura efetiva da fonte;
- t - tempo necessário para uma partícula deslocar-se da fonte até a posição indicada pelas coordenadas x, y, z .

Segundo Holland (1953), a altura efetiva da fonte \bar{e} a altura física da chaminé associada aos efeitos: da diferença de temperatura entre o poluente e a atmosfera, da velocidade de escape do poluente, do diâmetro da chaminé, da pressão atmosférica e da velocidade do vento. A Equação II.2 \bar{e} aplicada utilizando-se um sistema de coordenadas cartesianas, cuja origem \bar{e} a torre do prédio do reator, com o eixo "x" orientado na direção do vento (Figura II.1).

Nesta formulação, o tamanho total da malha e os espaçamentos variam de acordo com a condição de estabilidade, da seguinte maneira: para uma atmosfera instável, usou-se uma grade de 1000 m na direção "x" por 500 m na direção "y", com espaçamentos de 100 m em "x" e de 50 m em "y"; para condições de neutralidade e estabilidade, uma grade de 10.000 m na direção "x" por 500 m na direção "y", com espaçamento de 1000 m em "x" e de 50 m em "y". No que se refere ao eixo "z", coordenada vertical, usou-se um comprimento total de 100 m com espaçamentos (Δz) de 10 m para as três situações vistas acima. No caso instável \bar{e} usada uma malha menor, porque o processo de difusão ocorre em uma região muito próxima da fonte.

2.2 - PARÂMETROS FÍSICOS PARA O MODELO GAUSSIANO

Os parâmetros necessários à utilização da formulação gaussiana são: u , h , z , σ_y , σ_z , e a condição de insolação e nebulosidade. Nesse modelo, considerou-se que a velocidade do vento \bar{e} constante ao longo de sua direção em todo o campo, e que a altura efetiva da fonte \bar{e} de 50 metros.

2.2.1 - DESVIOS PADRÕES DA DISTRIBUIÇÃO DE CONCENTRAÇÃO

Para a aplicação das chamadas "curvas sigma" na formulação gaussiana, \bar{e} necessário o conhecimento das condições de estabilidade da atmosfera. Essas classes de estabilidade são determinadas através da insolação e nebulosidade (Tabela II.1) e da velocidade do vento (Tabela II.2).

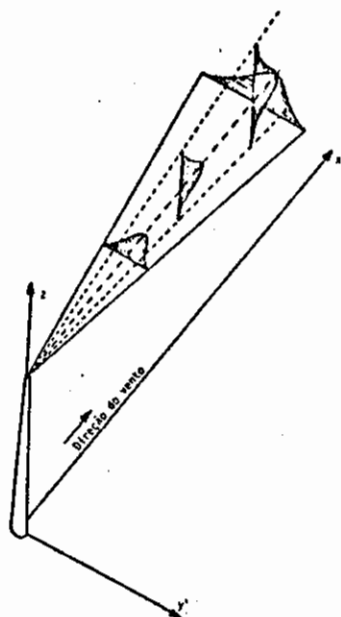


Fig. II.1 - Sistema coordenado que mostra a distribuição gaussiana.

FONTE: Perkins (1974), p. 186.

TABELA II.1

CATEGORIAS DE INSOLAÇÃO

ALTITUDE SOLAR	CÉU CLARO	CÉU NUBLADO*	
		NUVENS INTERMEDIÁRIAS	NUVENS BAIXAS
>60°	Forte	Moderada	Fraca
35° - 60°	Moderada	Fraca	Fraca
15° - 35°	Fraca	Fraca	Fraca

*Cobertura de nuvens $\geq 5/8$

FONTE: Lapa e Silva (1973), p. 24.

Estas condições são usadas na Tabela II.2.

TABELA II.2

CATEGORIAS DE ESTABILIDADE

VELOCIDADE DO VENTO (m/s)	INSOLAÇÃO			CONDIÇÕES NOTURNAS	
	FORTE	MODERADA	FRACA	≥ 3/8 DE NEBULOSIDADE**	< 3/8 DE NEBULOSIDADE
<2	A	B	B	-	-
2 - 3	B	B	C	E	F
3 - 5	B	C	C	D	E
5 - 6	C	D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

FONTE: Pasquill (1961), p. 43.

Condição:

- A - extremamente instável;
- B - moderadamente instável;
- C - levemente instável;
- D - de neutralidade*;
- E - levemente estável;
- F - moderadamente estável.

* Aplicável a uma cobertura espessa, dia ou noite.

** O grau de nebulosidade dado em octas é definido como a fração da abóbada celeste acima do horizonte aparente local, que está coberto por nuvens.

2.2.1.1 - ESTIMATIVA DE σ_y

Para estimativa de σ_y faz-se uso das curvas de estabilidade formuladas por Pasquill (1961), as quais relacionando velocidade de vento e condições de insolação, fornecem σ_y em função da distância até a fonte.

Segundo Vogt (1977), as curvas de σ_y podem ser ajustadas usando-se a seguinte aproximação:

$$\sigma_y = (a_1 \ln x' + a_2) x' \quad (II.3)$$

onde x' é a coordenada na direção do vento, e

a_1 e a_2 são coeficientes que variam de acordo com a classe de estabilidade.

TABELA II.3

COEFICIENTES DE DIFUSÃO

CATEGORIA DE DIFUSÃO	A	B	C	D	E	F
a_1	-0,0234	-0,0147	-0,0117	-0,0059	-0,0059	-0,0029
a_2	-0,3500	0,2480	0,1750	0,1080	0,0880	0,0540

FONTE: Vogt (1977), p. 51.

Usando-se a Equação II.3 e a Tabela II.3, e fixando-se valores de " x' ", obtêm-se as curvas constantes da Figura II.2.

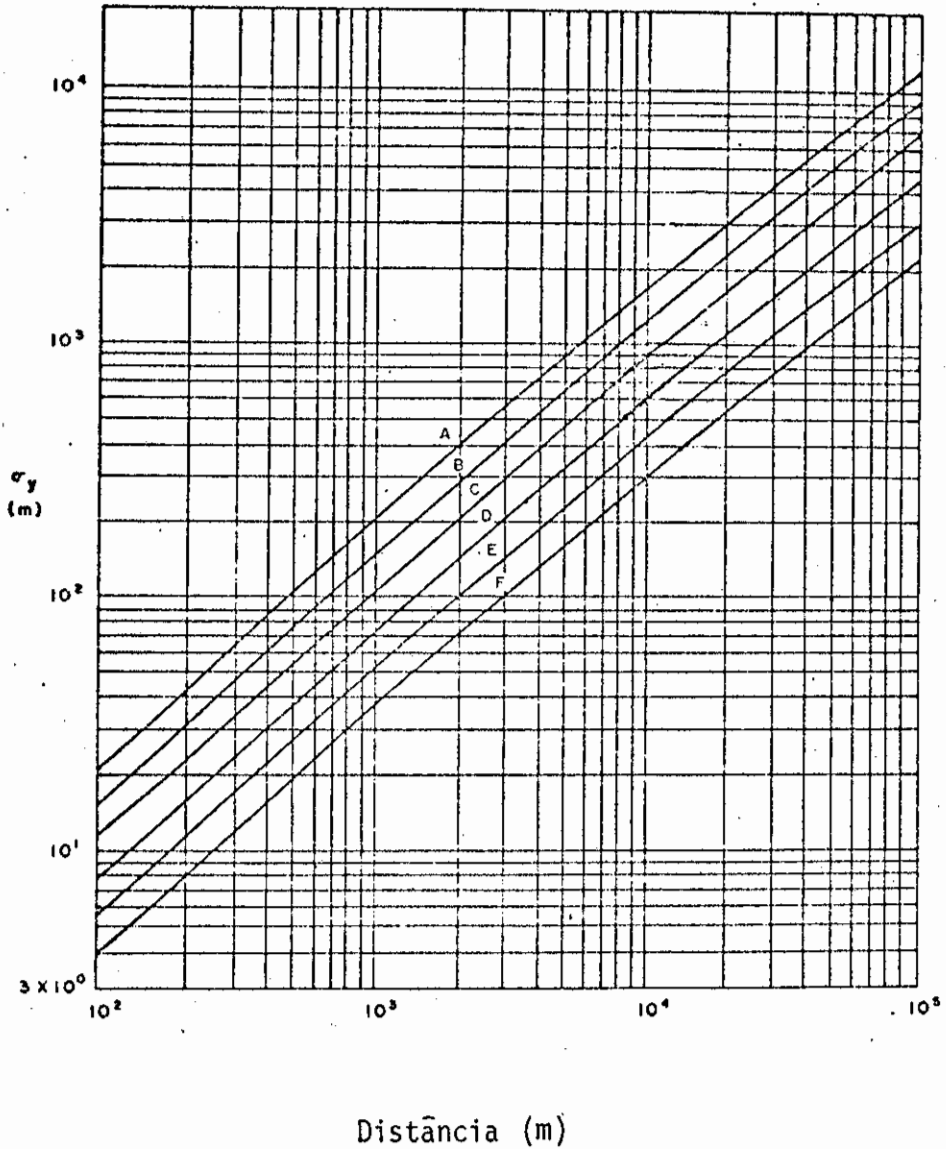


Fig. II.2 - Desvio padrão da distribuição horizontal de concentração em função da distância à fonte.

FONTE: Pasquill (1961), p. 42.

2.2.1.2 - ESTIMATIVA DE σ_z

Quanto ao cálculo de σ_z , embora a aplicação das curvas de estabilidade proposta por Pasquill (1961) seja questionável para fontes elevadas, sugere-se o uso das mesmas quando os dados de fluxo de calor à superfície não forem disponíveis. Nesse caso, o valor de σ_z pode ser aproximado através da expressão (Vogt, 1977):

$$\sigma_z(x') = \frac{1}{2,15} \cdot e^{(b_1 + b_2 \ln x' + b_3 \ln^2 x')} \quad (\text{II.4})$$

onde b_1 , b_2 , e b_3 são coeficientes de difusão que variam para cada classe de estabilidade.

Usando-se a Equação II.4 e os valores da Tabela II.4, e fixando-se valores de x' , obtêm-se as curvas da Figura II.3.

TABELA II.4

COEFICIENTES DE DIFUSÃO

CATEGORIA DE DIFUSÃO	A	B	C	D	E	F
b_1	0,8800	-0,9850	-1,1860	-1,3500	-2,8800	-3,8000
b_2	-0,1520	0,8200	0,8500	0,7930	1,2550	1,4190
b_3	0,1475	0,0168	0,0045	0,0022	-0,0420	-0,0550

FONTE: Vogt (1977), p. 24.

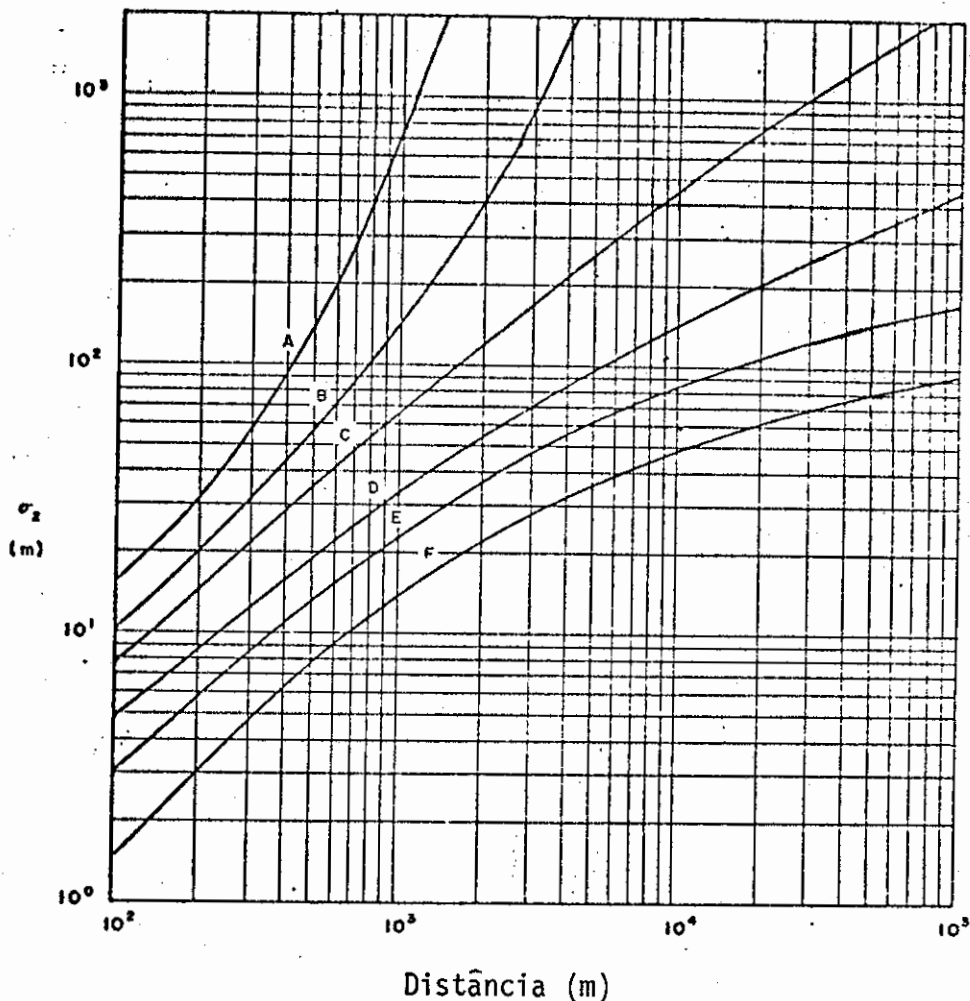


Fig. II.3 - Desvio padrão da distribuição vertical de concentração em função da distância à fonte.

FONTE: Pasquill (1961), p. 42.

Introduzindo-se os dados meteorológicos observados nas tabelas de classificação e aplicando-os na Equação II.2, calcularam-se os valores de concentração para cada nó da grade.

2.3 - A FORMULAÇÃO NUMÉRICA

O modelo numérico foi aplicado a uma área quadrilátera de 20 km de lado, com o prédio do reator no centro e com a altura coincidente com a base da inversão térmica. Este volume foi gradeado com células, grade-volumes de 2 km de lado, sendo o eixo "x" orientado no sentido oeste-leste, o eixo "y" no sentido sul-norte, e o eixo "z" perpendicular a "x" e "y" (Figura II.4). O tamanho do espaçamento vertical varia de acordo com a altura da base da inversão térmica, mantendo o número de espaçamentos constante.

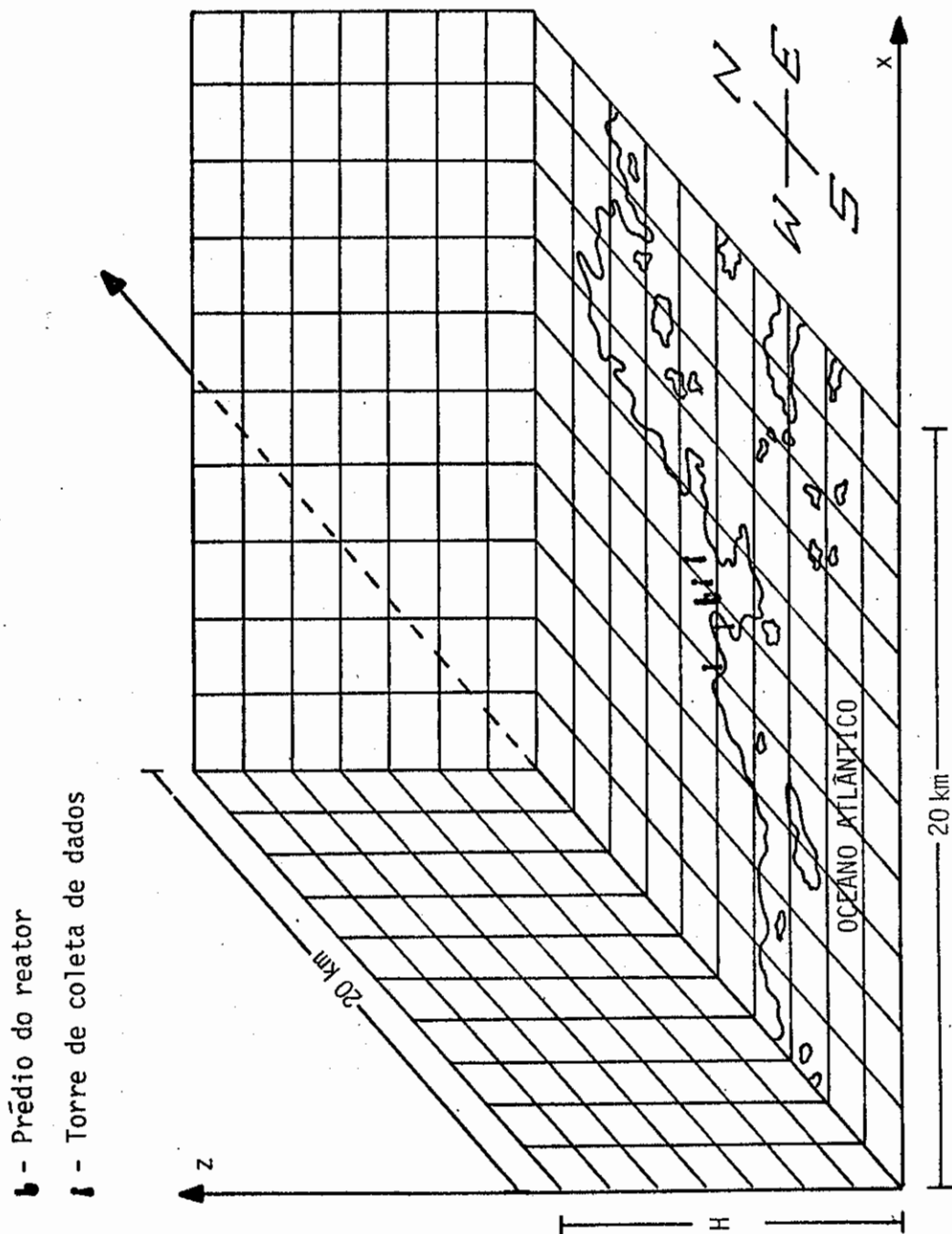


Fig. II.4 - Sistema coordenado usado no modelo numérico e que mostra a região de Angra dos Reis e os espaços-grade.

Este modelo fundamenta-se num esquema utilizado por Shir e Shieh (1974), no qual são feitas algumas aproximações e simplificações para sua melhor adaptação ao problema em estudo.

A equação fundamental tem a seguinte forma:

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla \bar{X} = K_H \nabla_H^2 \bar{X} + \frac{\partial}{\partial z} (K_V \frac{\partial \bar{X}}{\partial z}) + Q \quad (\text{II.5})$$

onde:

\bar{X} - concentração média local do poluente;

\bar{V} - vetor vento médio local;

Q - poder de emissão da fonte;

K_H - coeficiente de difusividade turbulento horizontal;

K_V - coeficiente de difusividade turbulento vertical;

∇_H^2 - operador laplaceano horizontal.

As condições de contorno são:

$$K_V \frac{\partial \bar{X}}{\partial z} = 0 \quad z = 0, \text{ e } z = H \quad (\text{II.6})$$

$$\frac{\partial^2 \bar{X}}{\partial x^2} = 0 \quad x = 0, \text{ e } x = x_{\max} \quad (\text{II.7})$$

$$\frac{\partial^2 \bar{X}}{\partial y^2} = 0 \quad y = 0, \text{ e } y = y_{\max} \quad (\text{II.8})$$

onde:

H - altura da camada de mistura;

x_{\max} - limite da área a leste;

y_{\max} - limite da área ao norte.

O termo de difusão vertical é zero na superfície e na altura da camada de mistura (H), isto é, supõe-se que tanto o limite superior quanto o inferior são perfeitamente impermeáveis ao poluente.

Segundo testes feitos por Shir e Shieh (1974), as Condições II.7 e II.8 que extrapolam a concentração fora da região, servem de razoável aproximação quando a região de estudo é grande com relação à área de emissão, uma vez que as condições exatas de contorno não são disponíveis. Outrossim, segundo os mesmos autores, na prática, a colocação de condições de contorno aproximadas não causa problemas sérios porque os termos de advecção horizontal, dominantes na difusão horizontal, são somente de primeira ordem no espaço derivativo.

É usado um esquema de diferenças finitas centradas, de segunda ordem, para integrar os termos horizontais de difusão e advecção, e o método de Crank-Nicholson para os termos de difusão vertical. A representação esquemática dos métodos de diferenças finitas é mostrada na Figura II.5.

A aproximação para a Equação da concentração na forma de diferenças finitas é a seguinte:

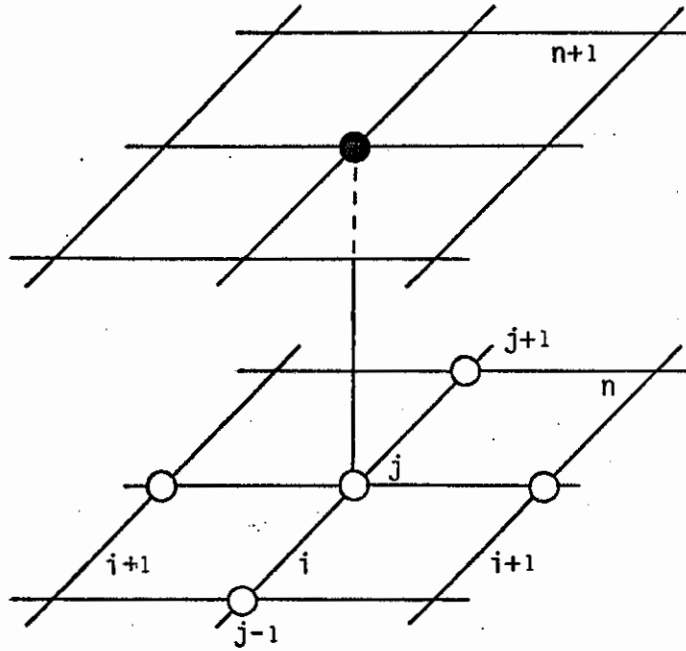
$$x_{ijk}^{n+1} = x_{ijk}^n + u [x_{ijk}^n] + v [x_{ijk}^*] + w [x_{ijk}^{**}] + D_{xy} [x_{ijk}^n] + D_z [x_{ijk}] + \Delta t. Q/\Delta V \quad (II.9)$$

onde:

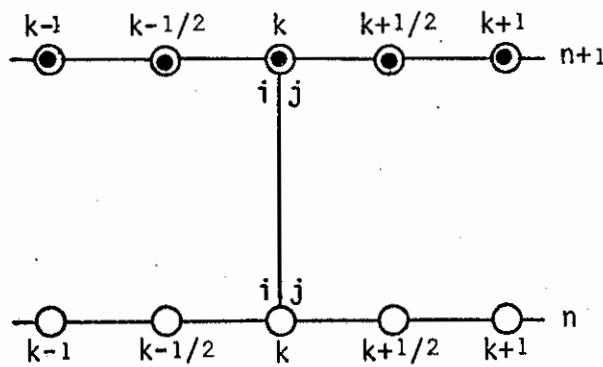
- u, v, w - operadores de diferenças finitas para advecção horizontal e vertical, respectivamente;
- D_{xy}, D_z - operadores de diferenças finitas para difusão horizontal e vertical, respectivamente;
- n - índice do incremento de tempo;
- Δt - incremento de tempo;
- i, j, k - índices de grade ao longo dos eixos x, y e z , respectivamente;
- ΔV - incremento de volume.

Legenda:

- valor a ser calculado (explícito)
- ⊙ valor a ser calculado (implícito)
- valor calculado



Centrada em espaço
Adiantada em tempo



Crank e Nicholson

Fig. II.5 - Esquemas de diferenças finitas

Os operadores U , V e W são definidos por:

$$\left. \begin{aligned} U [x_{ijk}] &= F_x [x_{ijk}] - F_x^* [x_{ijk}] \\ V [x_{ijk}] &= F_y [x_{ijk}] - F_y^* [x_{ijk}] \\ W [x_{ijk}] &= F_z [x_{ijk}] - F_z^* [x_{ijk}] \end{aligned} \right\} \quad (II.10)$$

onde:

$$\left. \begin{aligned} F_x [x_{ijk}] &= \frac{\alpha_{xi}}{2} [(1 + \alpha_{xi})x_{i-1,j,k} + (1 - \alpha_{xi})x_{ijk}] \\ F_x^* [x_{ijk}] &= \frac{\alpha_{xi}^*}{2} [(1 + \alpha_{xi}^*)x_{ijk} + (1 - \alpha_{xi}^*)x_{i+1,j,k}] \end{aligned} \right\} \quad (II.11)$$

$$\alpha_{xi} = \frac{\Delta t \cdot U_{i-1/2,j,k}}{\Delta x}$$

$$\alpha_{xi}^* = \frac{\Delta t \cdot U_{i+1/2,j,k}}{\Delta x}$$

então

$$\left. \begin{aligned} F_x [x_{ijk}] &= \frac{\Delta t \cdot U_{i-1/2,j,k}}{2 \cdot \Delta x} \left[\left(1 + \frac{\Delta t \cdot U_{i-1/2,j,k}}{\Delta x}\right) x_{i-1,j,k} + \right. \\ &\quad \left. \left(1 - \frac{\Delta t \cdot U_{i-1/2,j,k}}{\Delta x}\right) x_{ijk} \right] \\ F_x^* [x_{ijk}] &= \frac{\Delta t \cdot U_{i+1/2,j,k}}{2 \cdot \Delta x} \left[\left(1 + \frac{\Delta t \cdot U_{i+1/2,j,k}}{\Delta x}\right) x_{ijk} + \right. \\ &\quad \left. \left(1 - \frac{\Delta t \cdot U_{i+1/2,j,k}}{\Delta x}\right) x_{i+1,j,k} \right] \end{aligned} \right\} \quad (II.12)$$

com expressões similares para F_y , F_y^* , F_z e F_z^* , trocando-se os índices i , por j e k .

O método do tempo fracionado ("Time-Splitting"), no qual os novos valores de χ calculados do operador U são usados para o operador V foi empregado (Shir e Shieh, 1974).

Então:

$$\left. \begin{aligned} X_{ijk}^* &= X_{ijk}^n + u [X_{ijk}^n] \\ X_{ijk}^{**} &= X_{ijk}^* + v [X_{ijk}^*] \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.13})$$

Ainda segundo os mesmos autores, como a distribuição de χ não é suave, faz-se necessário um tratamento especial para prever erros de truncamento devido a amplificação. É usado, então, o seguinte método:

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \left\{ \begin{array}{l} X_{ijk}, \quad \text{se } \alpha_{xi} < 0, X_{ijk} < -F_x \\ X_{i-1,jk}, \quad \text{se } \alpha_{xi} > 0, X_{i-1,jk} < F_x \end{array} \right\} \\ F_x^* &= \left\{ \begin{array}{l} X_{ijk}, \quad \text{se } \alpha_{xi}^* > 0, X_{ijk} < F_x^* \\ X_{i+1,jk}, \quad \text{se } \alpha_{xi}^* < 0, X_{i+1,jk} < F_x^* \end{array} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.14})$$

Um procedimento análogo é adotado para F_y , F_y^* , F_z e F_z^* . Este método pode preservar a quantidade de concentração quando ela é transportada de uma grade para outra; pode, também, evitar que os valores de concentração tornem-se negativos devido a erro de truncamento.

Os operadores D_{xy} e D_z são definidos por:

$$D_{xy} [X_{ijk}] = \Delta t K_H \left[\frac{(X_{i-1,jk} - 2X_{ijk} + X_{i+1,jk})}{\Delta x^2} + \frac{(X_{i,j-1,k} - 2X_{ijk} + X_{i,j+1,k})}{\Delta y^2} \right] \quad (II.15)$$

$$D_z [X_{ijk}^{n+1}] = \gamma_k \{ \lambda D [X_{ijk}^{n+1}] + (1 - \lambda) D [X_{ijk}^n] \} \quad (II.16)$$

onde

$$D [X_{ijk}] = K_{k-1/2} [X_{ij,k-1} - (K_{k-1/2} + K_{k+1/2})X_{ijk} + K_{k+1/2} X_{ij,k+1}] \quad (II.17)$$

onde λ é uma constante paramétrica, e $\gamma_k = \frac{\Delta t}{2\Delta z_k^2}$.

Nessas condições, a Equação II.16 torna-se:

$$D_z [X_{ijk}^{n+1}] = \frac{\Delta t}{2\Delta z_k^2} \left\{ \gamma_k [K_{k-1/2}(X_{ij,k-1}^{n+1} - (K_{k-1/2} + K_{k+1/2})X_{ijk}^{n+1} + K_{k+1/2}X_{ij,k+1}^{n+1})] + (1 - \lambda) [K_{k-1/2}(X_{ij,k-1}^n - (K_{k-1/2} + K_{k+1/2})X_{ijk}^n + K_{k+1/2}X_{ij,k+1}^n)] \right\} \quad (II.18)$$

Segundo Ritchmyer e Morton (1967), o critério de estabilidade de computacional para os termos de advecção horizontal é:

$$\frac{\Delta t \cdot U}{\Delta x} < 1 \quad (II.19)$$

E, segundo estes autores, o critério de estabilidade para os termos de difusão vertical \bar{e} :

$$K\gamma_k \begin{cases} \leq \frac{1}{4(1-2\lambda)} & \text{para } \lambda \leq 1/2 \\ > 0 & \text{para } \lambda > 1/2 . \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Esta condição de estabilidade computacional determina que o esquema implícito, usado na Equação II.16, é incondicionalmente estável para $\lambda \geq 1/2$. Entretanto, ele não pode evitar erros de truncamento quando o campo de concentração não é suave e os valores de γ_k são altos. Faz-se necessário, então, estabelecer uma outra condição.

Se o processo de difusão ocorre entre duas grades-volumes, o fluxo que atravessa a parede que os separa é proporcional a $-K\partial X/\partial z$. Este fluxo tenderá a zero quando o gradiente se aproximar de zero. Então, tem-se (Shir e Shieh, 1974):

$$\frac{(X_{ijk}^{n+1} - X_{ij,k+1}^{n+1})}{(X_{ijk}^n - X_{ij,k+1}^n)} \geq 0. \quad (\text{II.21})$$

Isto leva à condição

$$K_{k+1/2} \gamma_k \leq \frac{1}{4(1-\lambda)}. \quad (\text{II.22})$$

Usando-se estas condições de estabilidade, os parâmetros físicos necessários e reunindo-os na Equação II.9, podem-se estimar os valores de concentrações nesta grade-volume.

2.4 - PARÂMETROS FÍSICOS PARA O MODELO NUMÉRICO

Os parâmetros necessários para a integração da Equação II.9 são: V , K_H , K_V , Q e H . Destes, o Q pode ser obtido de acordo com as características da fonte.

2.4.1 - CAMPO DO VENTO

O vetor vento $\vec{V} = \vec{V}(x,y,z,t)$ é necessário em todos os pontos de grade para cada passo de tempo de integração. O campo do vento para a região total é obtido usando-se o esquema de interpolação ponderado. Este esquema é semelhante ao proposto por Wendell (1970)

$$\left. \begin{aligned} u_{ij} &= \frac{\sum_{m,n} (u_{mn}/r_{mn}^2)}{\sum_{m,n} (1/r_{mn}^2)} \\ v_{ij} &= \frac{\sum_{m,n} (v_{mn}/r_{mn}^2)}{\sum_{m,n} (1/r_{mn}^2)} \end{aligned} \right\} \quad (II.23)$$

O campo inicial é obtido considerando-se:

$$u_{mn} = u_{\epsilon} \text{ e } v_{mn} = v_{\epsilon} \text{ e } r_{mn} = r_{\epsilon}$$

onde

u_{ij}, v_{ij} - componente do vetor vento na grade da análise nas direções "x" e "y", respectivamente;

r_{ϵ} - distância do ponto grade (i,j) até a torre de coleta de dados;

$u_{\epsilon}, v_{\epsilon}$ - componentes do vetor medido na torre de coleta de dados " ϵ " nas direções "x" e "y", respectivamente;

u_{mn}, v_{mn} - componentes iniciais do vetor vento na grade da análise nas direções "x" e "y", respectivamente;

r_{mn} - distância do nó (i,j) até o nó (m,n).

As componentes verticais do vetor vento são obtidas para cada ponto grade a partir das componentes horizontais através da equação da continuidade.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{II.24})$$

com solução do tipo

$$w = w_0 - (\nabla_H \cdot \vec{V}) \Delta z. \quad (\text{II.25})$$

O perfil vertical do vento utilizado é uma lei de potência:

$$|v| = |v_s| \cdot \left(\frac{Z}{Z_s}\right)^P \quad (\text{II.26})$$

v , v_s - velocidade do vento às alturas Z e Z_s , respectivamente.

A potência "P" é dada por (Shir e Shieh, 1974):

$$P = \frac{\ln\left(\frac{|v_3|}{|v_1|}\right)}{\ln\left(\frac{Z_3}{Z_1}\right)}. \quad (\text{II.27})$$

Normalmente, os valores observados de P estão no intervalo 0,02 e 0,87.

Nos cálculos, supor-se-á que a direção do vento permanece constante com a altura, visto que este procedimento oferece resultados semelhantes aos obtidos, variando-se a direção com a altura (Shir e Shieh, 1974).

2.4.2 - COEFICIENTE DE DIFUSIVIDADE TURBULENTA

A difusividade turbulenta está diretamente ligada à intensidade da turbulência atmosférica, a qual é categorizada pela estabilidade da atmosfera.

Neste modelo será usada a classificação proposta por Pasquill (1961), com a seguinte modificação: - as classes de estabilidade que eram dadas por letras de "A" a "F" serão substituídas pelas classes -3, -2, -1, 0, 1 e 2, respectivamente (Tabela II.5).

TABELA II.5

CATEGORIAS DE ESTABILIDADE

VELOCIDADE DO VENTO (m/s)	INSOLAÇÃO			COBERTURA ≥ 4/8	COBERTURA ≤ 3/8
	FORTE	MODERADA	FRACA		
< 2	-3	-3	-2	3	3
2 - 3	-3	-2	-1	1	2
3 - 5	-2	-2	-1	0	1
5 - 6	-1	-1	0	0	0
> 6	-1	0	0	0	0

Golder (1972) estudou as relações entre as classes de estabilidade de Pasquill-Gifford e os parâmetros físicos da turbulência: com primato de Monin-Obukhov e rugosidade da superfície. A relação proposta por ele e adotada no presente trabalho é a seguinte:

$$\frac{1}{L} = \pm \left[d \cdot \ln \left(1,2 + \frac{10}{Z_0} \right) \right]^2 10^{f(s)} \quad (II.28)$$

$$f(s) = - \frac{a}{(1+b |s|^c)}$$

onde

$$a = 4, \quad b = 1,3, \quad c = 0,85, \quad d = 0,216586;$$

Z_0 - parâmetro de rugosidade aerodinâmica da superfície;

s - classe de estabilidade;

L - comprimento de Monin-Obukhov.

Na Equação II.28 o sinal de "L" deve ser sempre o mesmo que o de "s", sendo que:

$s = 0$ - condições neutras;

$s < 0$ - condições instáveis;

$s > 0$ - condições estáveis.

Quanto ao parâmetro de rugosidade da superfície terrestre, segundo experimento desenvolvido por Kung (1961) para uma superfície vegetada, tem-se:

$$\log Z_0 = -1,24 + 1,19 \log H^*$$

$$Z_0 = 10^{-1,24 + 1,19 \log H^*} \quad (\text{II.29})$$

onde H^* é a altura da cobertura vegetal.

No caso da superfície do oceano, considerou-se que o parâmetro de rugosidade da superfície era 0,003 m (Sutton, 1953).

Para calcular a estrutura da turbulência na camada limite planetária, foi usado um esquema proposto por Shir e Shieh (1973).

A distribuição vertical de "K", sob condições de neutralidade ($s=0$), pode ser escrita da seguinte forma:

$$K_N = u_* \ell \quad (II.30)$$

$$\ell = k_0 Z e^{-\frac{4Z}{H}} \quad (II.31)$$

onde:

K_N - coeficiente de difusividade vertical turbulenta sob condições de neutralidade;

u_* - velocidade de fricção;

k_0 - constante de von Kármán = 0,35 ;

H - altura da camada de mistura.

Segundo Sutton (1953), a velocidade de fricção pode ser escrita como:

$$u_* = \bar{u} k_0 \ln \frac{Z_0}{Z} \quad (II.32)$$

então:

$$K_N = \frac{\bar{u} k_0^2 Z \ln \left(\frac{Z_0}{Z} \right)}{e^{\frac{4Z}{H}}} \quad (II.33)$$

Para condições de não-neutralidade

$$K = \frac{K_s \ell}{\ell_s} \quad (II.34)$$

O subscrito "s" denota valores tomados para $Z = 10$ m.

$$K_s = u_* \cdot \ell_s \quad (II.35)$$

$$\text{Agora, } u_* = \frac{k_0 |V_s|}{\psi_m} \quad (\text{II.36})$$

$|V_s|$ - velocidade do vento a 10 m

$$\psi_m = \int_{Z_0}^Z \left(\frac{\phi_m}{z}\right) dz \quad (\text{II.37})$$

ϕ_m - cisalhamento adimensional do vento.

De acordo com Businger et alii (1971)

$$\phi_m = \begin{cases} 1 + \alpha \xi & , \xi > 0 \text{ (estabilidade)} \\ (1 - \beta \xi)^{-1/4} & , \xi < 0 \text{ (instabilidade)} \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

$$\xi = \frac{Z}{L}, \quad \alpha = 4,7, \quad \beta = 15.$$

Nestas condições:

$$\psi_m = \begin{cases} \ln \left(1 + \frac{Z}{Z_0}\right) + \alpha \xi & \text{para } \xi > 0 \\ \ln \left(1 + \frac{Z}{Z_0}\right) - 2 \ln \left(1 + \frac{\rho}{2}\right) - \ln (1 + \rho^2)/2 \\ \quad + 2 \text{TAN}^{-1} \rho - \frac{\pi}{2} & \text{para } \xi < 0 \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

onde

$$\rho = \frac{1}{\phi_m}.$$

2.4.3 - COEFICIENTE DE DIFUSIVIDADE TURBULENTA HORIZONTAL

O coeficiente de difusividade turbulenta horizontal ($K_H = 500 \text{ m}^2/\text{s}$) usado nessa formulação foi o mesmo utilizado por Shir e Shieh (1974), com bons resultados.

2.4.4 - ESTABILIDADE DA ATMOSFERA E ALTURA DA BASE DA CAMADA DE INVERSÃO

Para categorizar a condição de estabilidade da atmosfera adotou-se o seguinte procedimento: durante as seis primeiras horas de integração, condições noturnas com alguma nebulosidade (cobertura de nuvens igual a 3/8) - categoria E (levemente estável). No período das seis às dez horas, adotaram-se condições de insolação fraca e categoria C (neutra); das dez às dezesseis horas, insolação forte e categoria A (extremamente instável). Com essas considerações, adotou-se um comportamento provável de variação da altura da base da camada de inversão com o tempo, que é mostrado na Figura III.4. Obviamente, se a localidade dispuser de uma frequência maior de radiossondagens diárias, os dados de altura da base da camada de inversão poderão ser lidos diretamente e usados como dados de entrada para o modelo.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

As condições meteorológicas usadas no trabalho são situações típicas da região de Angra dos Reis, observadas nas quatro torres de coleta de dados, na estação de superfície da cidade de Angra dos Reis e no Aeroporto do Galeão, Rio de Janeiro.

A razão de emissão da fonte foi estimada em cerca de 10% da quantidade de plutônio produzido diariamente em um reator do tipo PWR, como o Angra I, ou seja $0,215 \times 10^{-4}$ Ci/s (Tiba, 1978). Este valor tem a mesma ordem de grandeza da taxa de emissão verificada no acidente em Oak Ridge em 1954 (Eisenbud, 1973). Supôs-se que a altura efetiva da fonte foi de 50 metros da superfície.

Na formulação da Pluma Gaussiana, estudaram-se três situações diferentes de condição de estabilidade. As condições meteorológicas e geográficas destas três situações são mostradas na Tabela III.1.

Os campos de concentração de 10, 50 e 100 metros de altura para a condição de instabilidade são mostrados na Figura III.1 a, b, c.

Como já foi apresentado, a malha usada para esta condição de instabilidade (categoria "A" de Pasquill) é diferente da usada para condição de neutralidade e estabilidade (categorias "D" e "F" de Pasquill, respectivamente). Este procedimento é usado porque para a categoria "A" de estabilidade o processo de dispersão ocorre em uma região bastante próxima da fonte. Isto é justificado pelo fato de que para esta categoria os ventos não são muito fortes, e tem-se insolação forte que propicia movimentos convectivos e acentuado espalhamento lateral (página A.2). A título de comparação, os valores de concentração da última coluna da página A.2 estão à mesma distância da fonte dos valores da primeira coluna das páginas A.3 e A.4 (neutro e estável, respectivamente). Além disso,

é interessante notar que o comportamento da pluma não pode ser previsto com segurança para distâncias maiores que 1.000 metros, uma vez que para a categoria de estabilidade "A" o σ_z é definido somente até pouco mais de 1.000 metros na direção do vento (Figura II.3).

TABELA III.1

CONDIÇÕES USADAS NA FORMULAÇÃO GAUSSIANA

CONDIÇÕES	INSTÁVEL	NEUTRA	ESTÁVEL
x'	1.000	10.000	10.000
$\Delta x'$	100	1.000	1.000
y'	500	500	500
$\Delta y'$	50	50	50
z	100	100	100
Δz	10	10	10
Vento (m/s)	2	6	3
Horário	diurno	noturno	noturno
Nebulosidade	céu claro	>4/8	<3/8
Classe de estabilidade	A	D	F

x' , y' e z em metros.

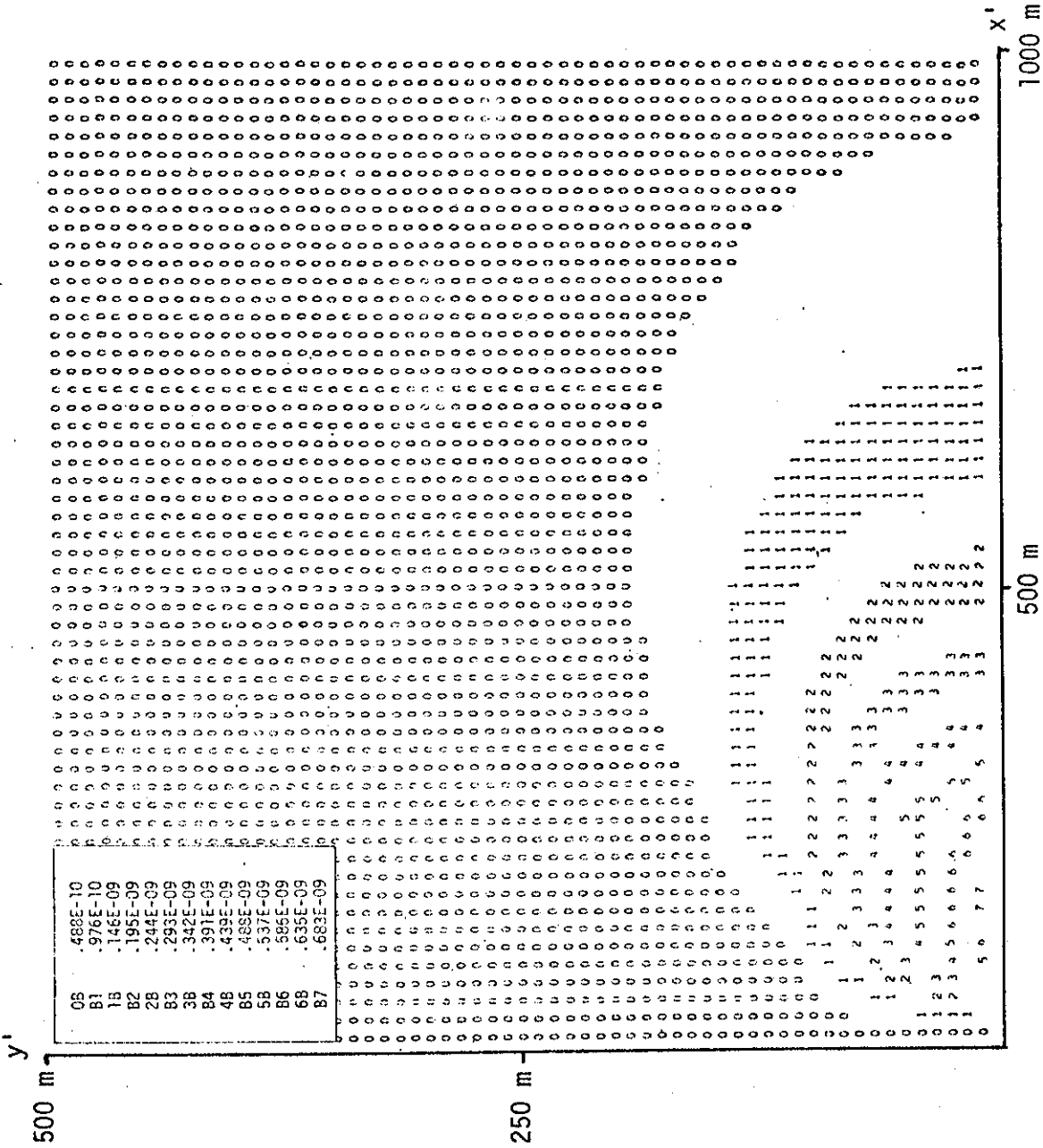


Fig. III.1a - Campos de concentração estimada através do modelo gaussiano para condições de instabilidade, a 10 metros de altura. (Continua)

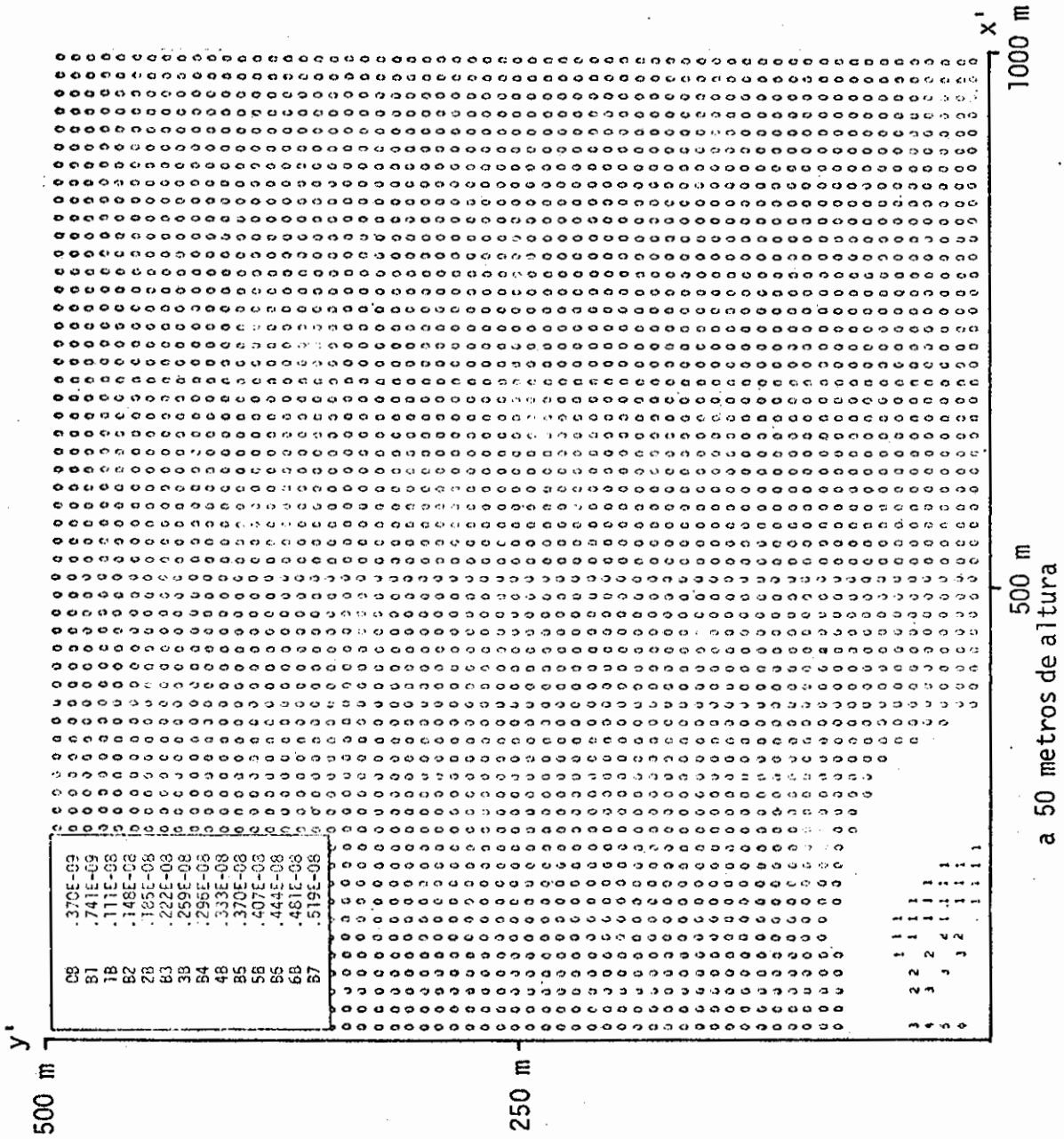
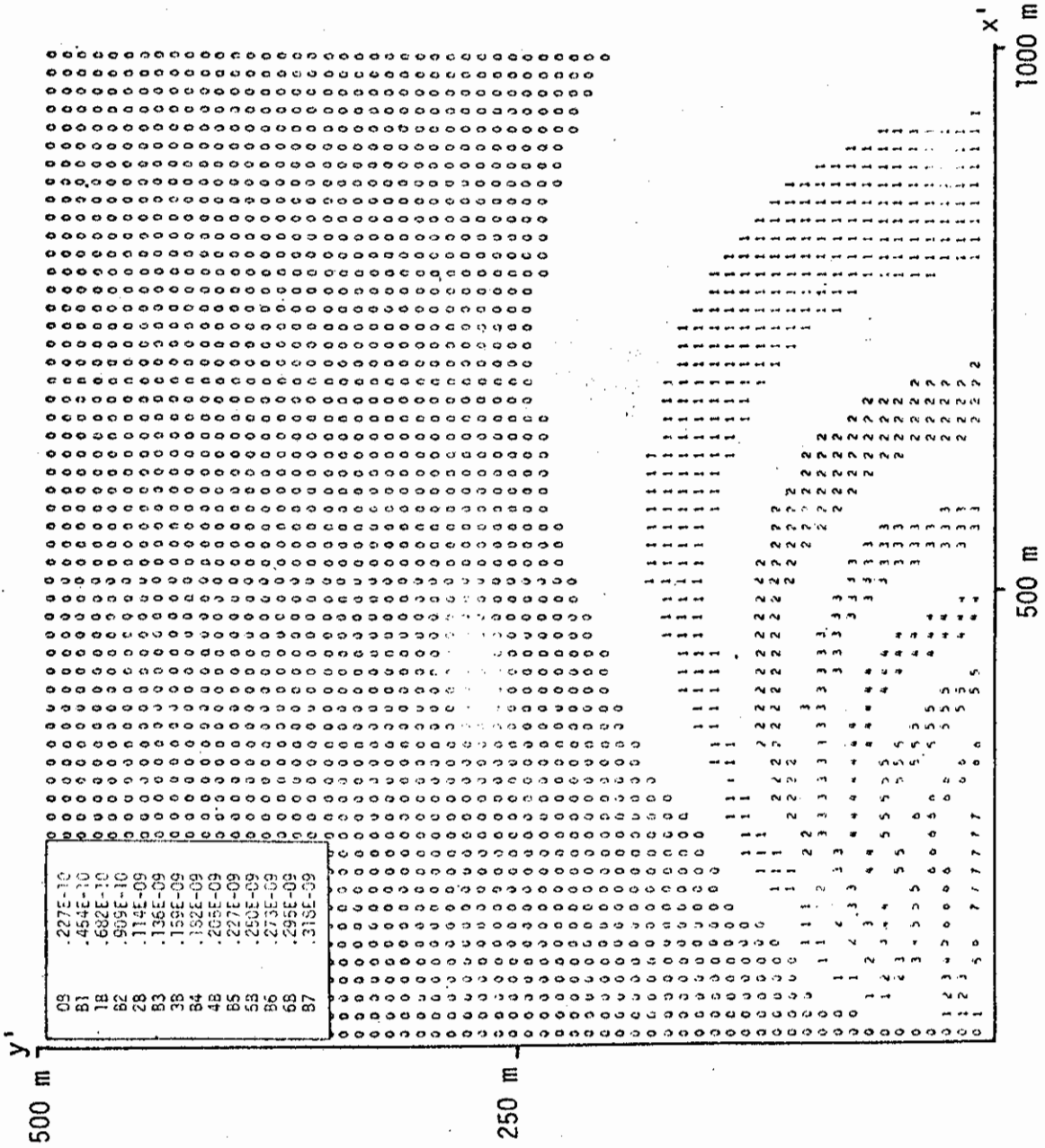


Fig.III.lb - Continuação

a 50 metros de altura



a 100 metros de altura

Fig. III.1c - Conclusão

Na Figura III.1 a,b,c, no nível de 50 metros (Figura III.1 b), aparentemente os valores de concentração aparecem somente em uma região muito pequena do campo, o que não corresponde à realidade (página A.2). Na verdade, o que ocorre é o seguinte: a cada dígito e espaço em branco que aparece no campo corresponde um intervalo de valores: como o número de intervalos é prefixado, quando o campo apresenta um intervalo muito grande entre os valores máximo e mínimo, perde-se em qualidade ou representação de valores, pois nos campos os valores fora do nível mais significativo recebem o dígito zero. No nível de 50 metros (Figura III.1 b) por exemplo, valores de ordem menor ou igual a 10^{-10} são representados pelo dígito zero, enquanto nos níveis de 10 e 100 metros (Figura III.1 a, c) concentrações dessa mesma ordem de grandeza (página A.2) levam os dígitos 1 e 2.

Para condições de neutralidade e estabilidade, os campos de concentração para 10, 50 e 100 metros de altura são mostrados nas Figuras III.2 a, b, c e III.3 a, b, c.

Em condições de neutralidade, como pode ser visto na página A.3, embora os valores de concentração sejam menores (Figura III.2 b) que os da condição de estabilidade (página A.4 e Figura III.3 b), o poluente se espalha em uma região maior em torno do eixo da pluma no nível da fonte e nos níveis vizinhos. Sob condições de estabilidade há um espalhamento menor de poluentes, embora ao longo do eixo da pluma a concentração seja alta, quando comparada com a condição de neutralidade (página A.3). Entretanto deve-se destacar que, sob as condições de tempo estudadas e para distâncias maiores que 5.000 metros, a condição de estabilidade apresenta valores de concentração mais elevados em todos os níveis (compare as páginas A.3 e A.4).

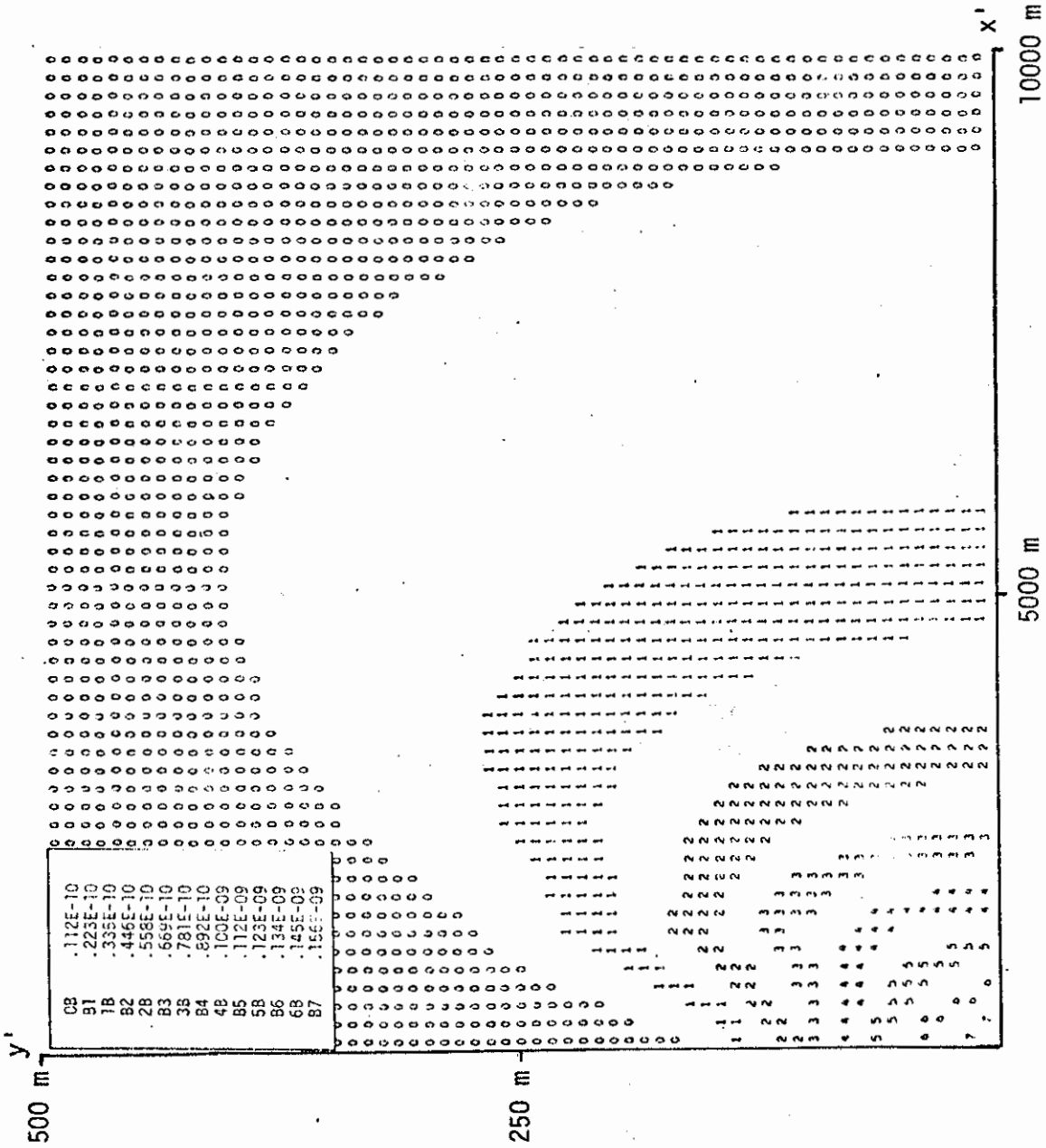
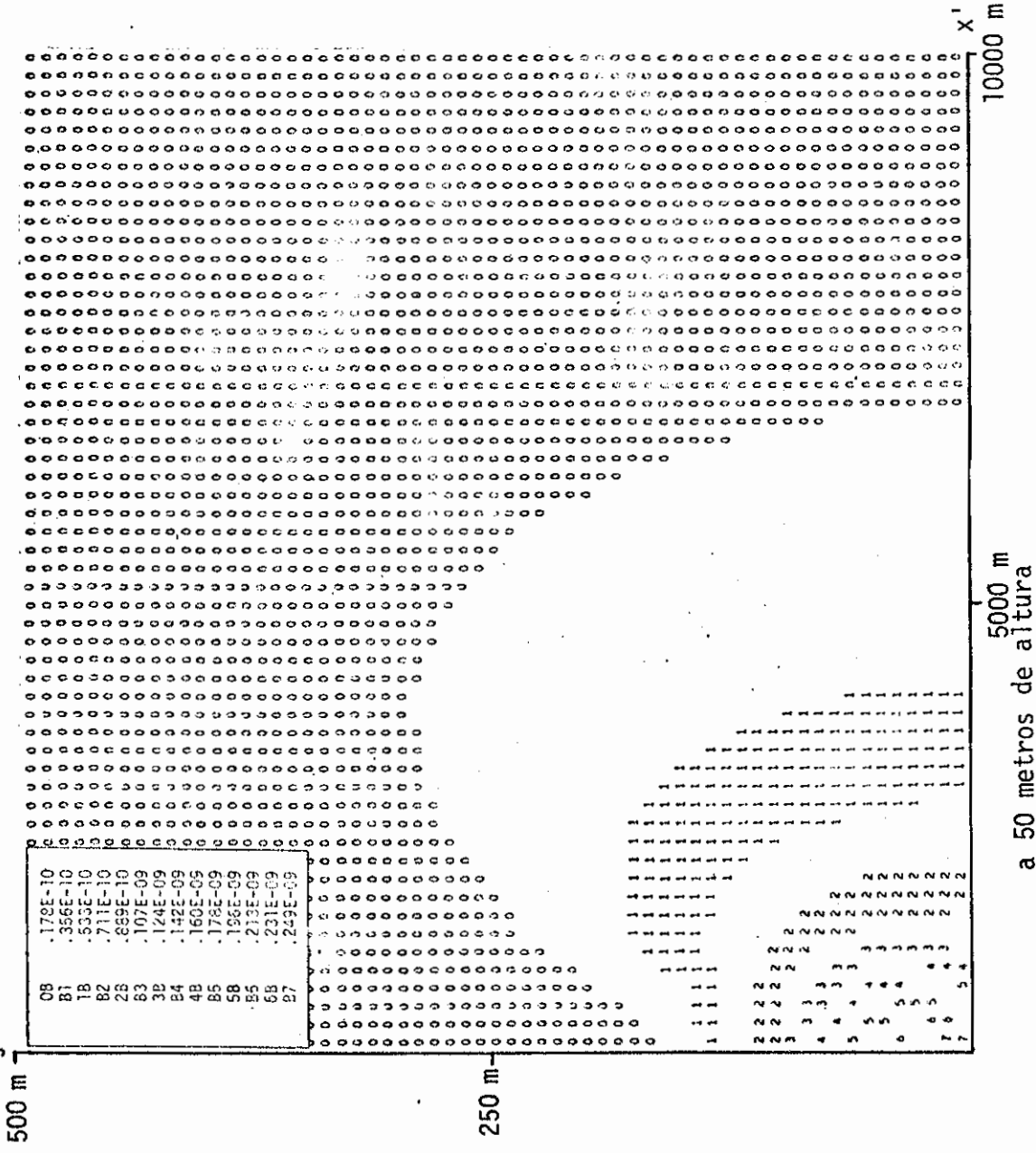
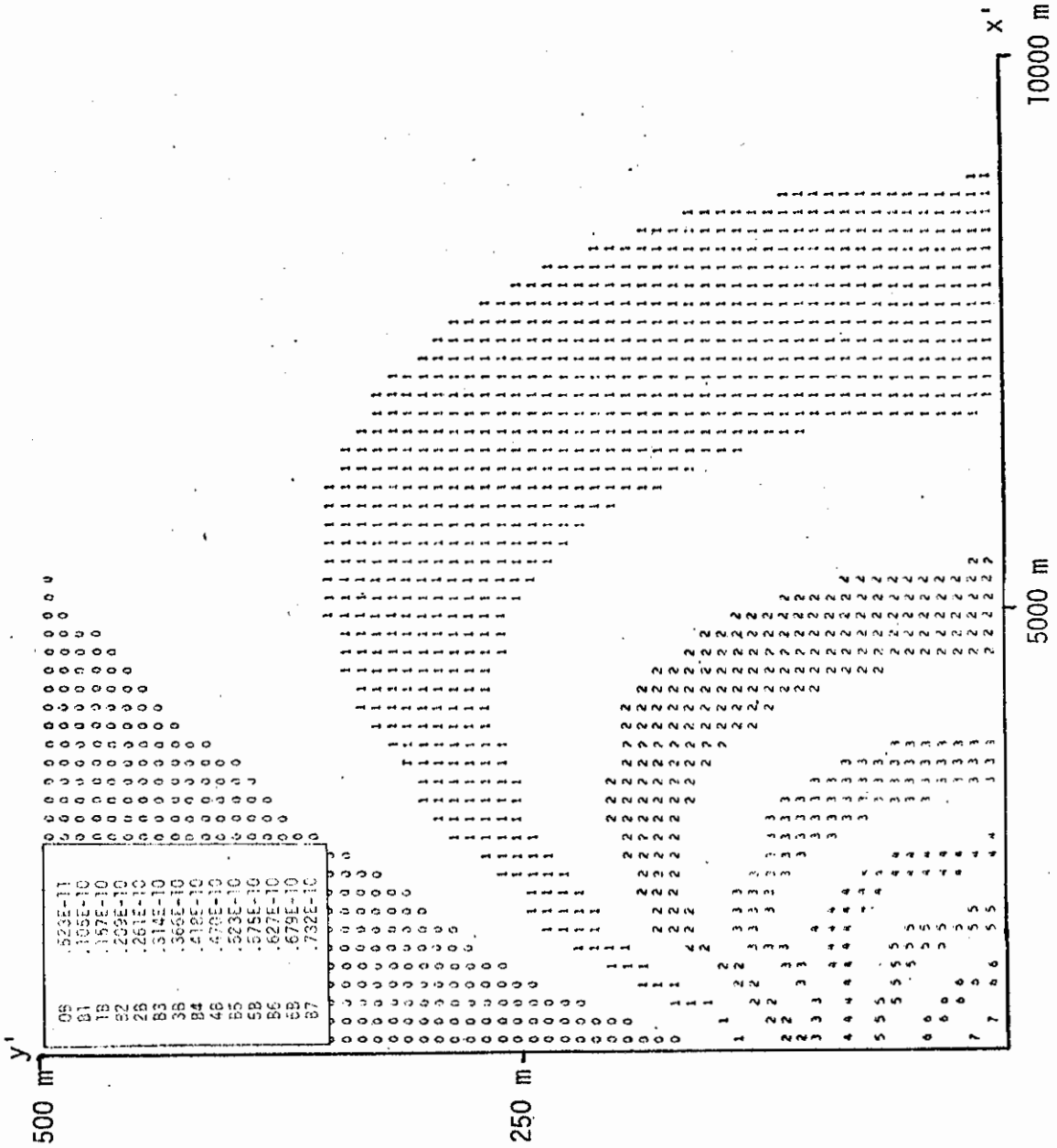


Fig. III.2a - Campos de concentração estimada através do modelo gaussiano para condições de neutralidade, a 10 metros de altura. (Continua)



5000 m
a 50 metros de altura

Fig. III.2b - Continuação



a 100 metros de altura

Fig. III.2c - Conclusão

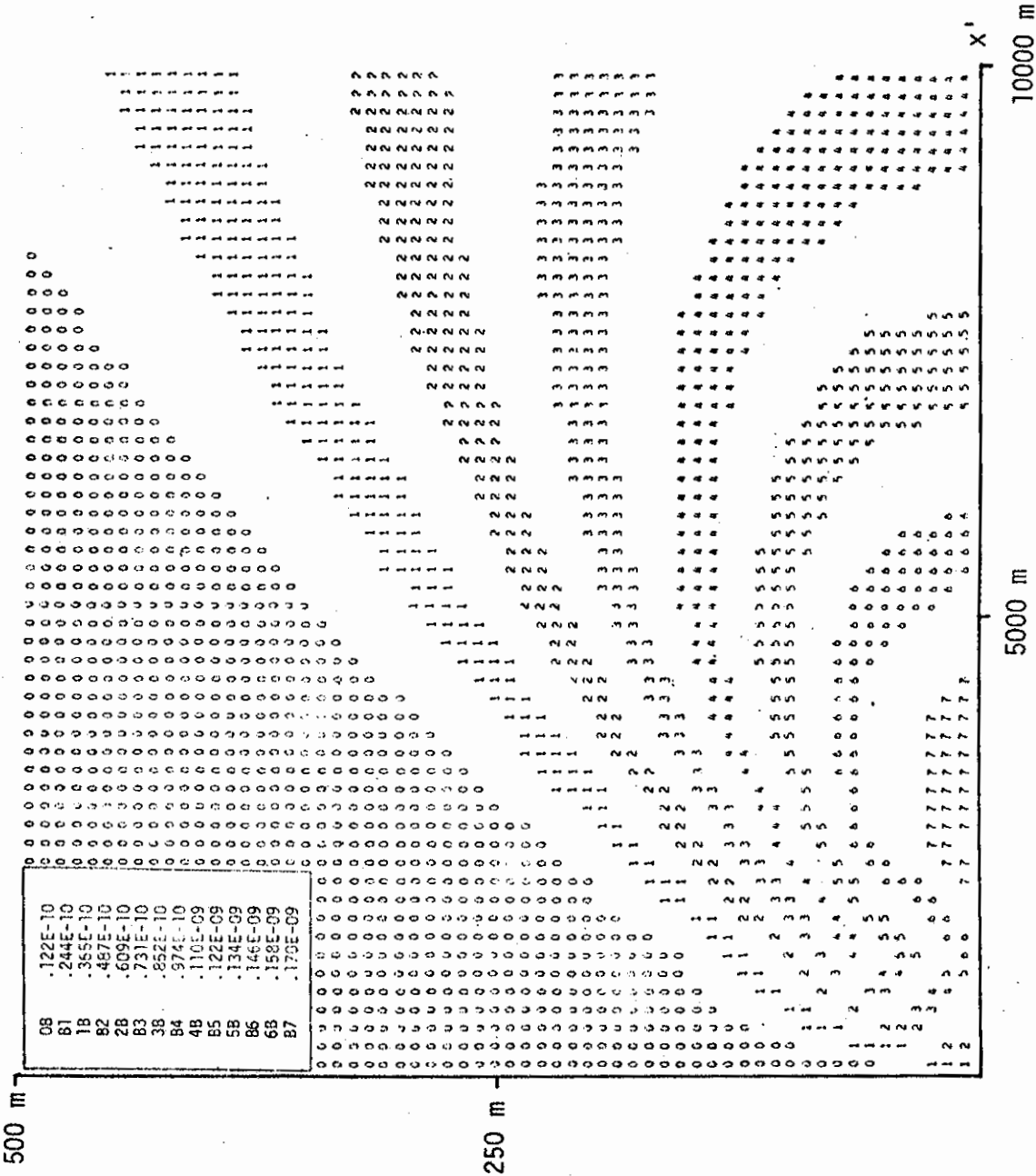


Fig. III.3a - Campos de concentração estimada através do modelo gaussiano para condições de estabilidade, a 10 metros de altura. (Continua)

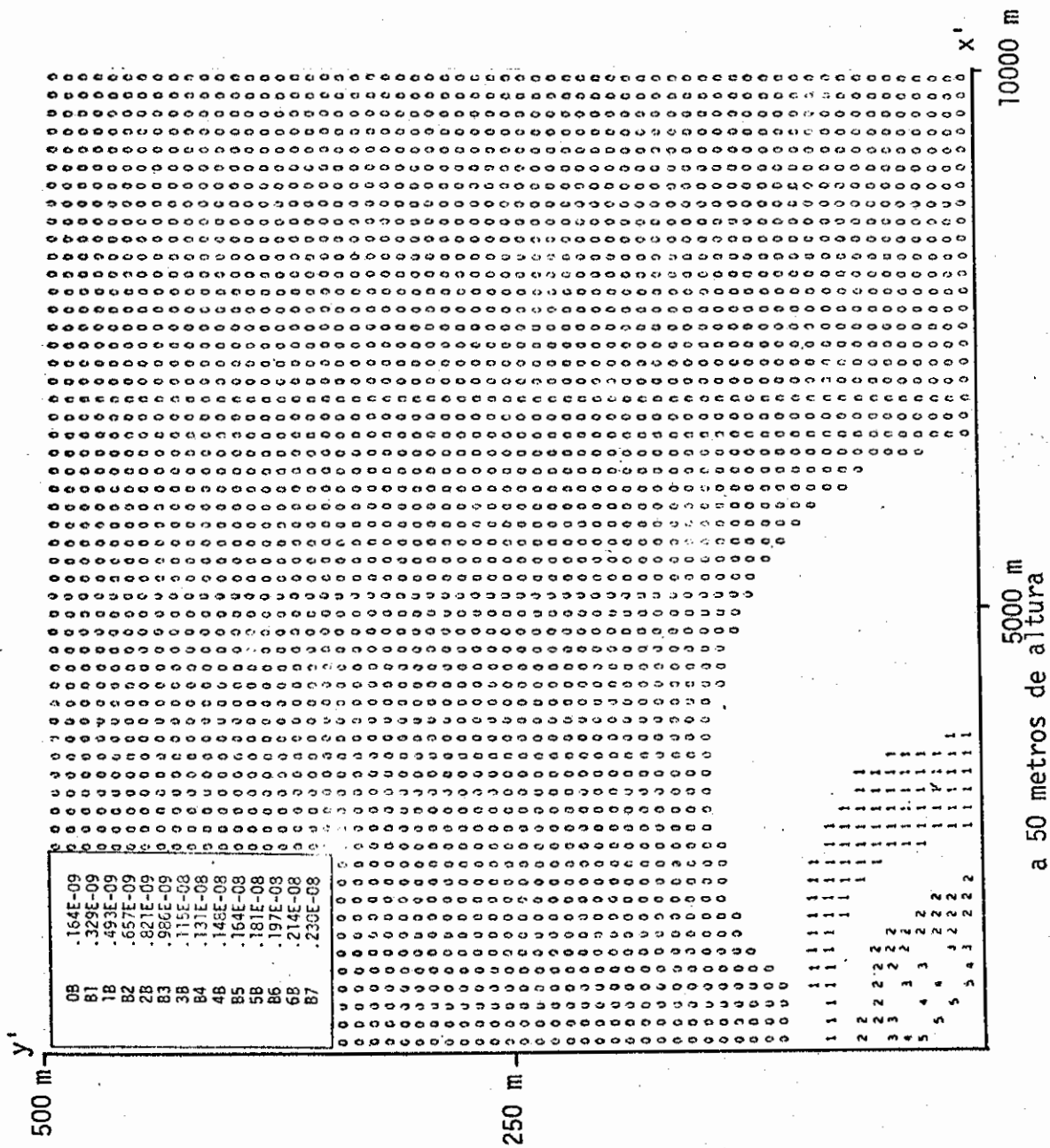


Fig. III.3b - Continuação

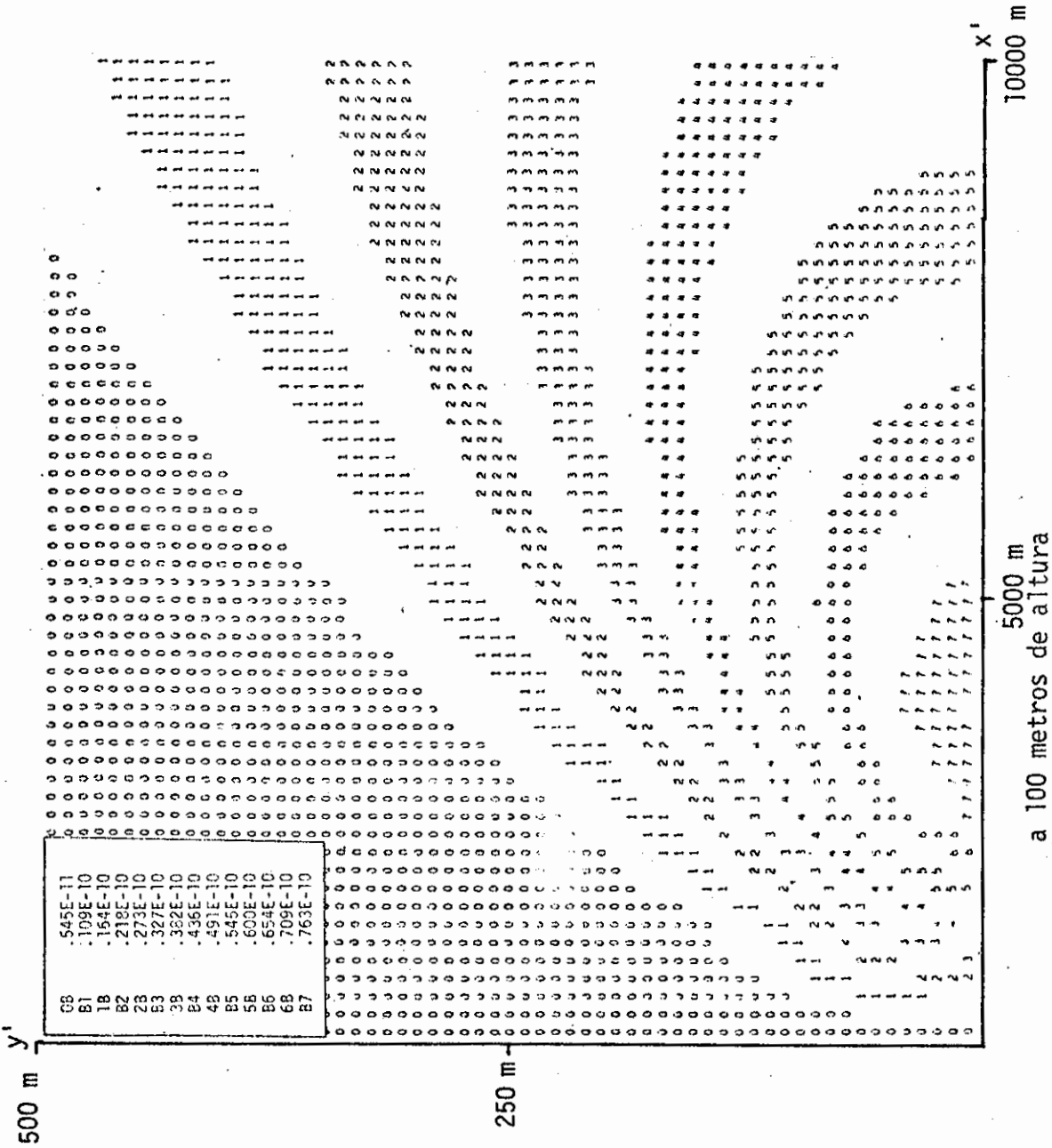


Fig. III.3c - Conclusão

Analisando-se as três sequências de figuras (III.1 a III.3), pode-se verificar que, na ausência de uma inversão no perfil da temperatura, a condição que mais favorece a eliminação de poluentes, no que se refere à poluição em regiões próximas à fonte, é a condição de estabilidade, pois, embora a concentração nas vizinhanças do eixo da pluma seja mais alta que na condição de neutralidade, ela se espalha numa faixa horizontal mais estreita. A condição menos propícia à eliminação de poluentes é a de instabilidade, dado que a dispersão ocorre numa região bem próxima à fonte.

Os valores obtidos nesses campos de concentração de poluentes (páginas A.2, A.3 e A.4) superam, na sua maioria, os valores permissíveis de plutônio para seres humanos.

Na Tabela III.2 têm-se dois tipos de exposição: "s" para o isótopo solúvel e "I" para o insolúvel. Leva-se em conta ainda se a exposição é ou não ocupacional, ou seja, se o indivíduo receptor frequentemente trabalha ou não com materiais radioativos.

O fluxograma para o cálculo da concentração usando-se a formulação da Pluma Gaussiana pode ser visto na página C.2.

No modelo numérico usou-se uma região de 2×10^4 metros na direção "x", orientada no sentido oeste-leste, por 2×10^4 metros na direção "y", orientada no sentido sul-norte, e com comprimento na direção "z" variando de acordo com a altura da base da camada de inversão. Os espaçamentos utilizados foram de 2×10^3 metros nas direções "x" e "y" e variam entre 10 e 40 metros, segundo a direção "z".

TABELA III.2

ÍNDICES PERMITIDOS PELA AEC (ATOMIC ENERGY COMMISSION)
PARA ALGUNS RADIONUCLÍDEOS MAIS COMUNS NO AR

ELEMENTO	ISÓTOPO	TIPO DE EXPOSIÇÃO	EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL (Ci/m ³)	EXPOSIÇÃO NÃO-OCUPACIONAL (Ci/m ³)
Carbono	¹⁴ C	S	4×10^{-6}	1×10^{-7}
Césio	¹³⁷ Cs	S	6×10^{-8}	2×10^{-9}
		I	1×10^{-8}	5×10^{-10}
Cobalto	⁶⁰ Co	S	3×10^{-7}	1×10^{-8}
		I	9×10^{-9}	3×10^{-10}
Enxôfre	³⁵ S	S	3×10^{-7}	9×10^{-9}
		I	3×10^{-7}	9×10^{-9}
Estrôncio	⁸⁹ Sr	S	3×10^{-8}	3×10^{-10}
		I	4×10^{-8}	1×10^{-9}
Estrôncio	⁹⁰ Sr	S	1×10^{-9}	3×10^{-11}
		I	5×10^{-9}	2×10^{-10}
Ferro	⁵⁹ Fe	S	1×10^{-7}	5×10^{-9}
		I	5×10^{-8}	2×10^{-9}
Hidrogênio	³ H	S	5×10^{-6}	2×10^{-7}

(Continua)

Conclusão da Tabela III.1

ELEMENTO	ISÓTOPO	TIPO DE EXPOSIÇÃO	EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL (Ci/m ³)	EXPOSIÇÃO NÃO-OCUPACIONAL (Ci/m ³)
Iodo	¹³¹ I	S	9×10^{-9}	1×10^{-10}
		I	3×10^{-7}	1×10^{-8}
Manganês	⁵⁴ Mn	S	4×10^{-7}	1×10^{-8}
		I	4×10^{-8}	1×10^{-7}
Plutônio	²³⁹ Pu	S	2×10^{-12}	6×10^{-14}
		I	4×10^{-11}	1×10^{-12}
Polônio	²¹⁰ Po	S	5×10^{-10}	2×10^{-11}
		I	2×10^{-10}	7×10^{-12}
Rádio	²²⁶ Ra	S	3×10^{-11}	3×10^{-12}
		I	5×10^{-11}	2×10^{-12}
Radônio	²²² Rn	S	1×10^{-7}	3×10^{-9}
Urânio	²³⁵ U	S	5×10^{-10}	2×10^{-11}
		I	1×10^{-10}	4×10^{-12}
Zinco	⁶⁵ Zn	S	1×10^{-7}	4×10^{-9}
		I	6×10^{-8}	2×10^{-9}

FONTE: Eisenbud (1973), p. 64.

Supõe-se que a concentração inicial em todos os nós da malha foi de $0,184 \times 10^{-23}$ Ci/m³, e o incremento de tempo para a integração de 120 segundos. A fonte de poluição está localizada no centro desta região e sua altura efetiva varia de acordo com a base da camada de inversão; esta fonte fica em média, a 40 metros de altura.

As condições meteorológicas usadas foram as seguintes: velocidade de vento de 0,1 m/s a 10 metros de altura e de 0,5 m/s a 50 metros de altura, com direção de 220°, durante toda a integração. Nas seis primeiras horas de integração, o período é noturno e a cobertura de nuvens é maior que 4/8; da sexta à décima-hora, já no período diurno, a insolação é fraca; das dez às dezesseis horas a insolação passa a ser forte; e das dezesseis às vinte e quatro horas, o período é noturno com cobertura de nuvens menor que 3/8. Com referência à altura da base da camada de inversão, considerou-se o seguinte: esta altura, associada a um sistema de alta pressão de grande escala, é normalmente mais baixa durante a noite. Após o amanhecer, ela se eleva, devido ao aquecimento da superfície, até atingir uma altura máxima no período da tarde. Ao entardecer, ela volta a baixar devido ao resfriamento da coluna atmosférica. As inversões de radiação têm um comportamento um pouco distinto: ao entardecer, a inversão começa a surgir com base na superfície, e seu topo vai se elevando durante a madrugada até se estabilizar. Após o amanhecer, a base da camada de inversão de radiação começa a subir devido ao aquecimento e, no começo da tarde, essa inversão é quebrada. O processo volta a se repetir no final da tarde. Para efeito de cálculo, esses comportamentos foram simplificados adotando-se um perfil contínuo (Figura III.4).

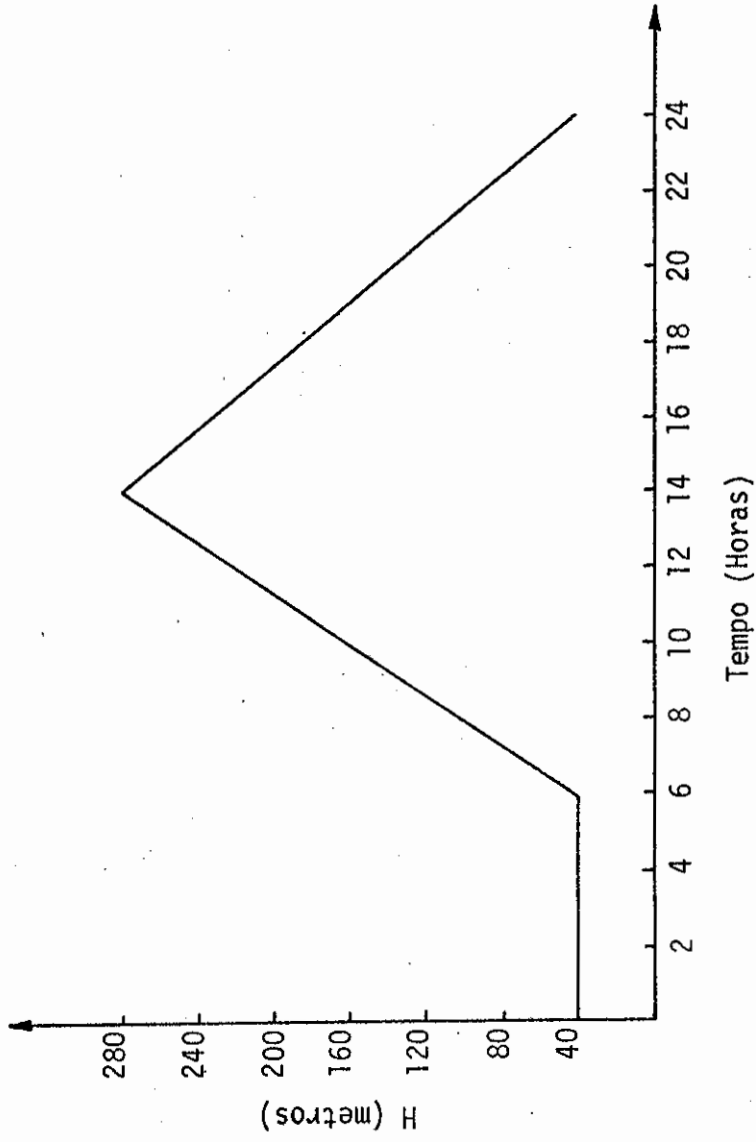


Fig. III.4 - Perfil assumido da altura da base da camada de inversão.

Nas Figuras III.5 a,b,c a III.7 a,b,c podem ser vistos os campos de concentração para a primeira, décima-segunda e vigésima-quarta horas, respectivamente, em três níveis cada um.

A Figura III.5 a,b,c mostra os campos de concentração para as alturas de 10, 40 e 70 metros, após a primeira hora do início da emissão. As condições meteorológicas são horário noturno com nebulosidade de alta e baixa velocidade de vento, o que sugere uma situação estável. Os valores de concentração ao nível de 10 metros variam entre $0,185 \times 10^{-18}$ e $0,186 \times 10^{-22}$ Ci/m³; no nível de 40 metros entre $0,956 \times 10^{-9}$ e $0,132 \times 10^{-18}$ Ci/m³; e no nível de 70 metros entre $0,125 \times 10^{-11}$ e $0,206 \times 10^{-22}$ Ci/m³ (Seção B.2). Nesta primeira hora, nota-se um movimento predominantemente ascendente dentro desta camada, evidenciado pelo aumento das concentrações do poluente nos níveis superiores, e um movimento lento da massa de poluente na direção do vento. Na Seção B.2 pode-se notar ainda que, no nível de 40 metros (nível da fonte), boa parte do campo apresenta valores que superam o índice permitido na Tabela III.2. Também no nível de 70 metros, uma pequena região começa a apresentar valores que superam tal índice.

Após a décima-segunda hora do início da emissão, a altura da base da camada de inversão ascendeu dos 70 metros iniciais para cerca de 280 metros de altura. Agora, as condições meteorológicas são: período diurno com forte insolação e baixa velocidade do vento, o que sugere uma situação de instabilidade nos níveis mais baixos. A Figura III.6 a,b,c e a Seção B.3 mostram os campos de concentração para as alturas de 40, 160 e 280 metros. Os valores de concentração no nível de 40 metros variam entre $0,406 \times 10^{-9}$ e $0,585 \times 10^{-14}$ Ci/m³; no nível de 160 metros entre $0,162 \times 10^{-10}$ e $0,582 \times 10^{-14}$ Ci/m³; e no nível de 280 metros entre $0,167 \times 10^{-13}$ e $0,324 \times 10^{-16}$ Ci/m³ (Seção B.3). Neste caso, a altura efetiva da fonte está no primeiro nível (40 metros). Também nesta situação, existe um leve movimento ascendente na direção do eixo da pluma, que pode ser notado pelos valores mais altos de concentração no canto superior direito da Figura III.6 b,c e também na Seção B.3. Embora a influência da emissão da fonte pareça ser pequena nos níveis de 160 e 280 metros, pois estes dois campos (Figura III.6 b,c) são bastante homogêneos,

há um aumento no valor da concentração no campo todo, com predominância maior na direção do vento. No nível de 40 metros, a maior parte do campo apresenta valores que superam o índice da Tabela III.2; no nível de 160 metros, uma pequena região apresenta valores superiores ao índice permitido; e no nível de 280 metros, em nenhuma região do campo os valores atingem o índice da Tabela III.2.

Após a vigésima-quarta hora do início da emissão, a altura da base da camada de inversão que teve um máximo por volta das 14 horas sofreu um decréscimo contínuo até atingir 70 metros novamente. As condições de tempo - que eram período noturno com vento fraco e pouca nebulosidade ($<3/8$) - passam a ter uma nebulosidade maior ($>4/8$), o que leva a uma condição de maior estabilidade da atmosfera. A Figura III.7 a,b,c mostra os campos de concentração para as alturas de 10, 40 e 70 metros. Os valores de concentração a 10 metros variam entre $0,168 \times 10^{-9}$ e $0,610 \times 10^{-12}$ Ci/m³; a 40 metros variam entre $0,376 \times 10^{-9}$ e $0,261 \times 10^{-13}$ Ci/m³; e a 70 metros entre $0,785 \times 10^{-13}$ e $0,902 \times 10^{-15}$ Ci/m³ (página B.4). Nesta hora, com o abaixamento da altura da base da camada de inversão, evidencia-se o aumento do valor de concentração nos níveis mais baixos (página B.4), com o campo ao nível de 10 metros (Figura III.7 a) apresentando valores que na sua totalidade, superam o índice permitido pela Atomic Energy Commission (Tabela III.2), uma vez que o menor valor deste nível é de $0,612 \times 10^{-12}$ Ci/m³. No nível de 40 metros (Figura III.7 b) grande parte do campo apresenta valores que superam o referido índice. No nível de 70 metros (Figura III.7 c) os valores não atingem o índice da Tabela III.2.

A altura efetiva da fonte, a concentração aumenta sensivelmente da primeira para a décima-segunda hora após o início da emissão em todos os campos; os valores para a primeira hora variam entre $0,953 \times 10^{-9}$ e $0,132 \times 10^{-18}$ Ci/m³ e para a décima-segunda hora entre $0,406 \times 10^{-9}$ e $0,585 \times 10^{-14}$ Ci/m³. Da décima-segunda para a vigésima-quarta hora, a concentração aumenta em alguns pontos e diminui em outros, embora em termos de concentração absoluta haja um aumento, visto que o valor mínimo calculado na vigésima-quarta hora é de $0,261 \times 10^{-13}$ Ci/m³.

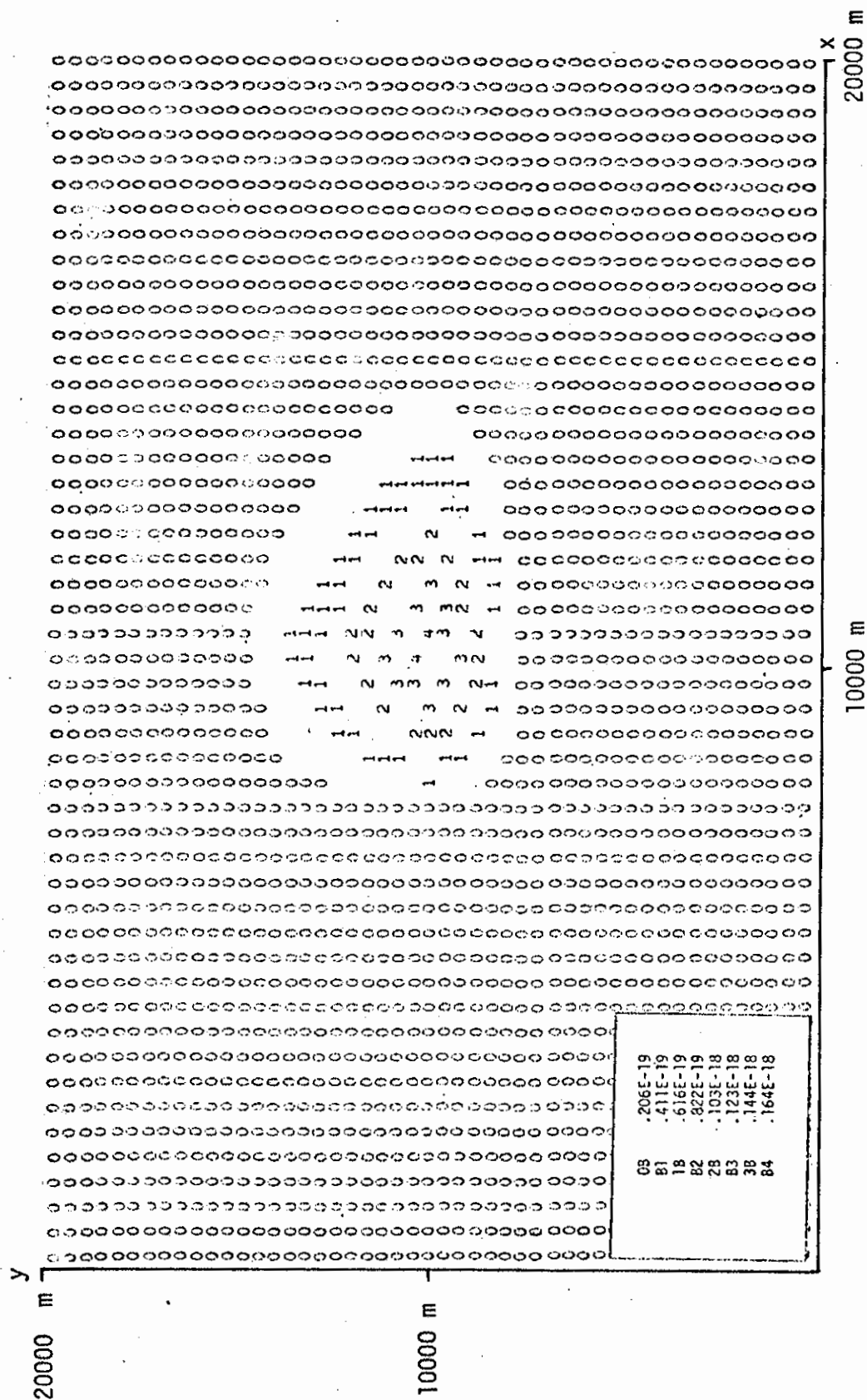
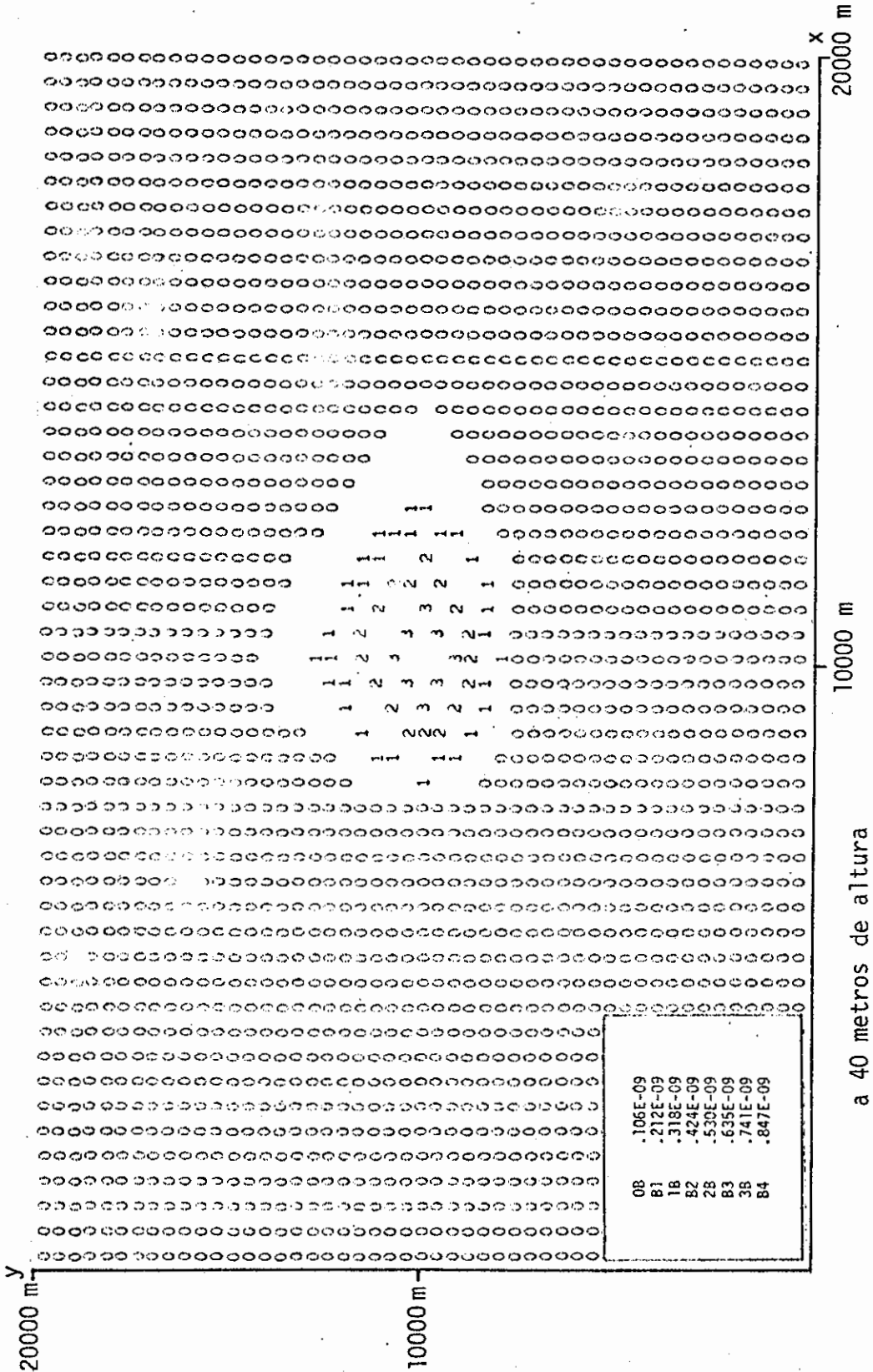


Fig. III.5a - Campos de concentração estimada através do modelo numérico após 1 hora de integração, a 10 metros de altura. (Continua)



a 40 metros de altura

Fig. III.5b - Continuação

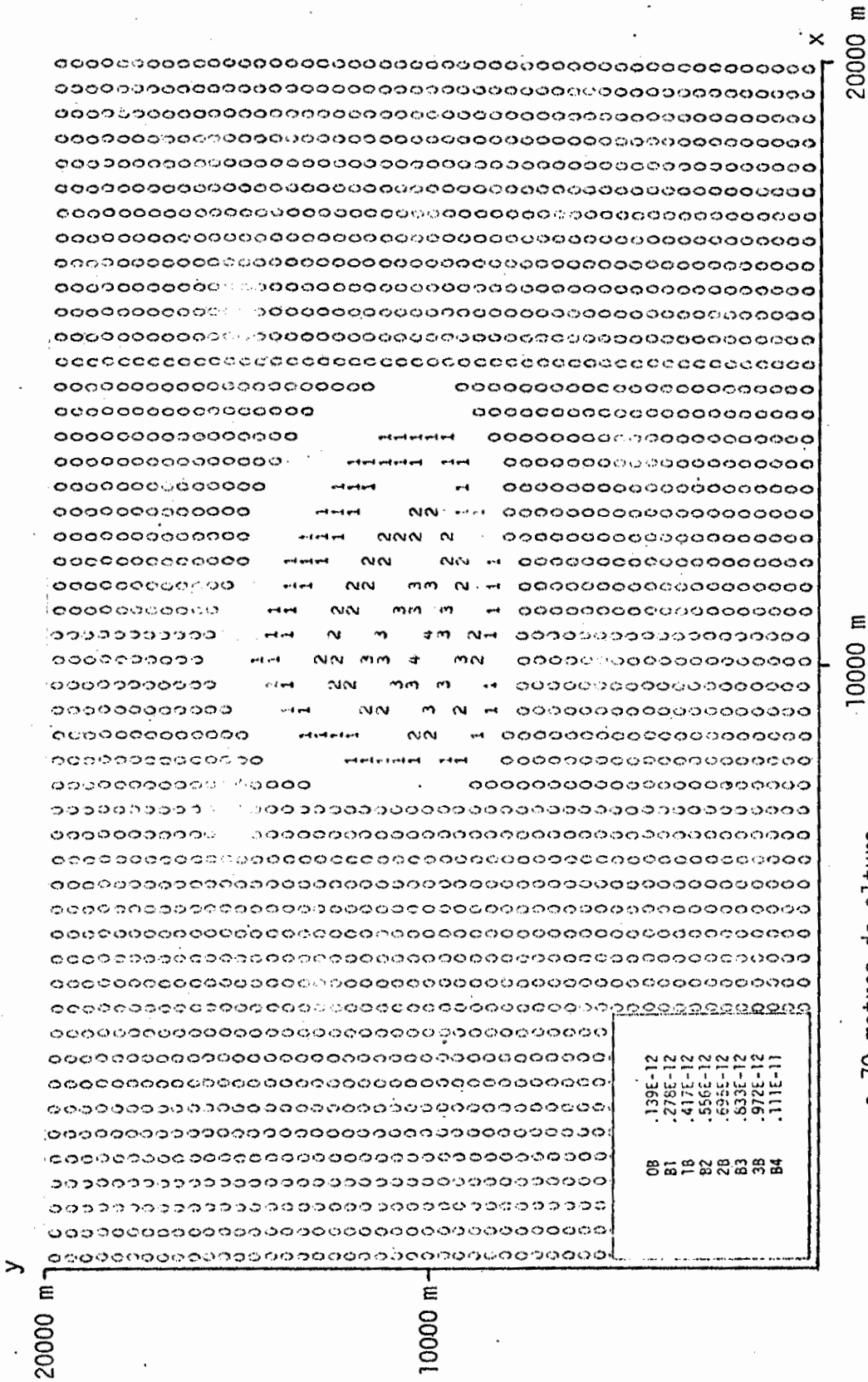


Fig. III.5c - Conclusão

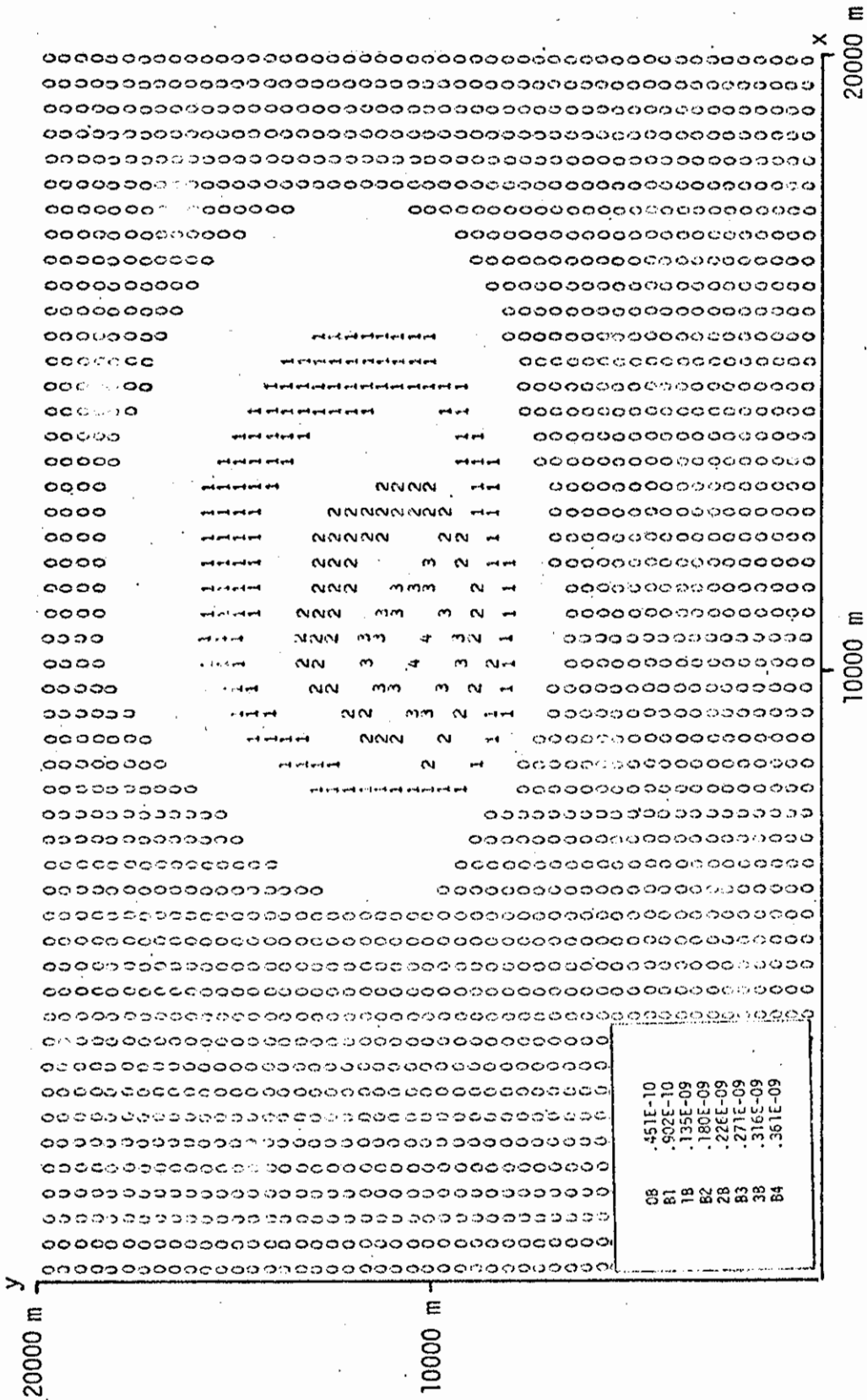
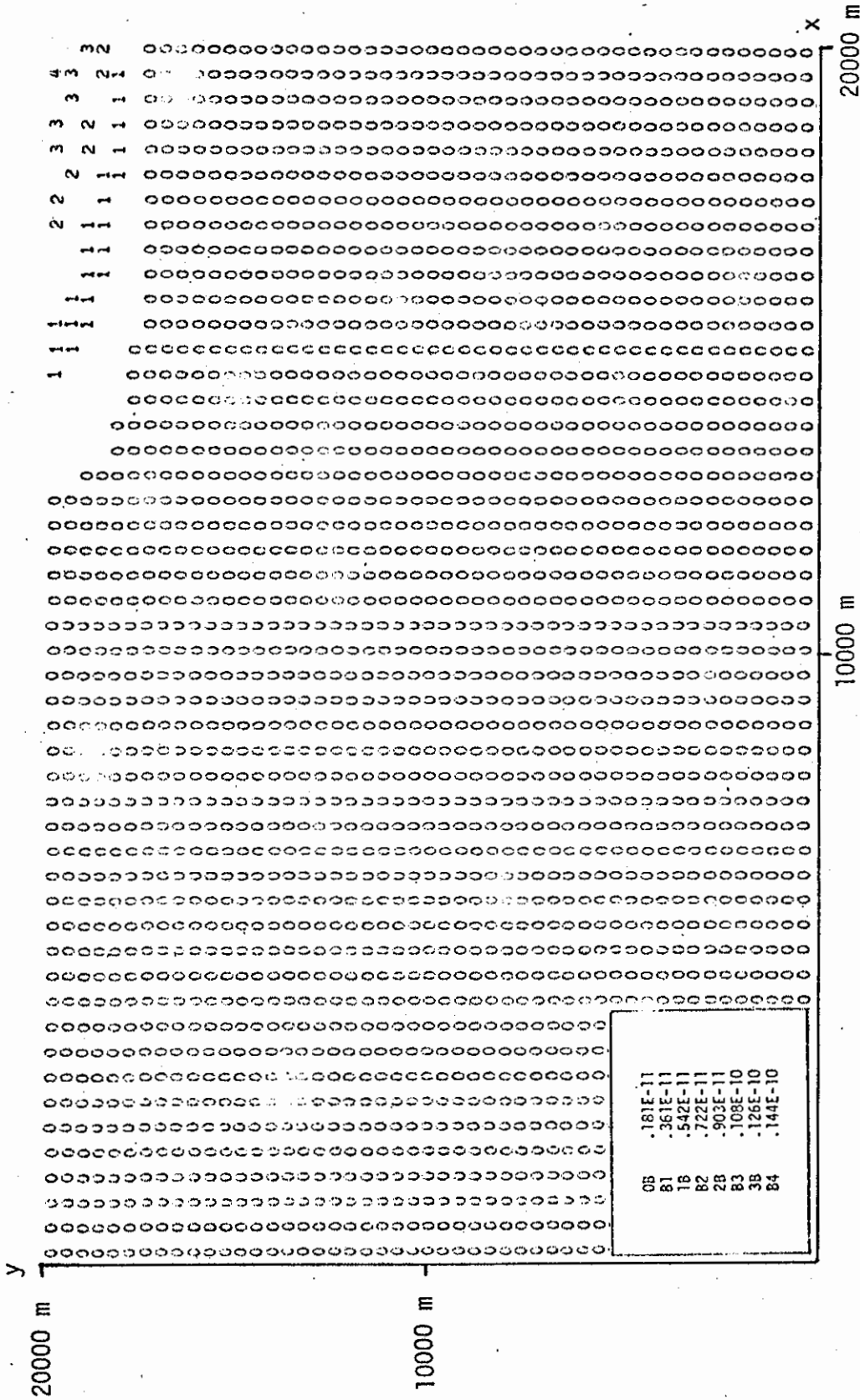


Fig. III.6a - Campos de concentração estimada através do modelo numérico após 12 horas de integração, a 40 metros de altura.

(Continua)



a 160 metros de altura

Fig. III.6b - Continuação

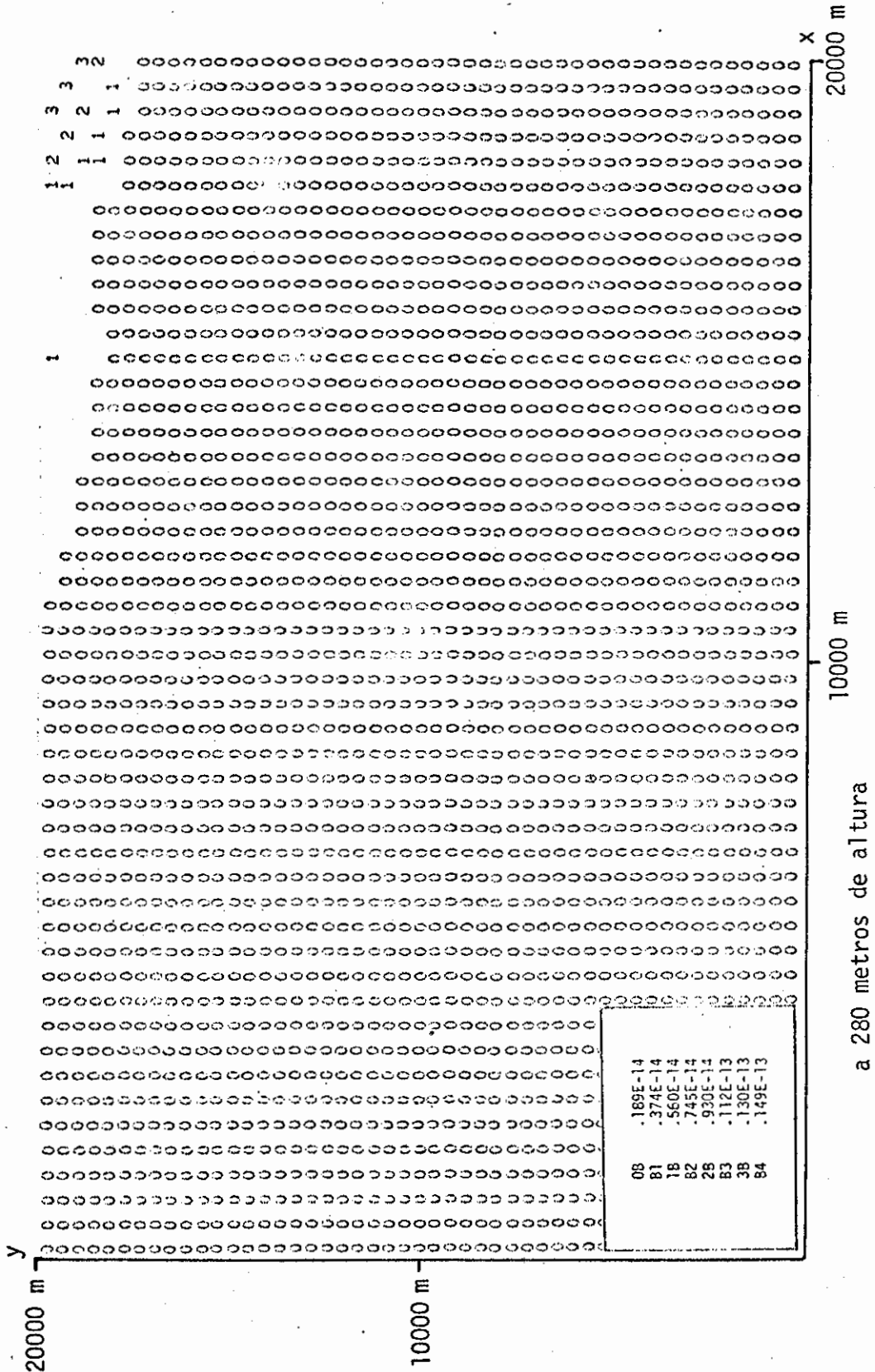


Fig. III.6c - Conclusão

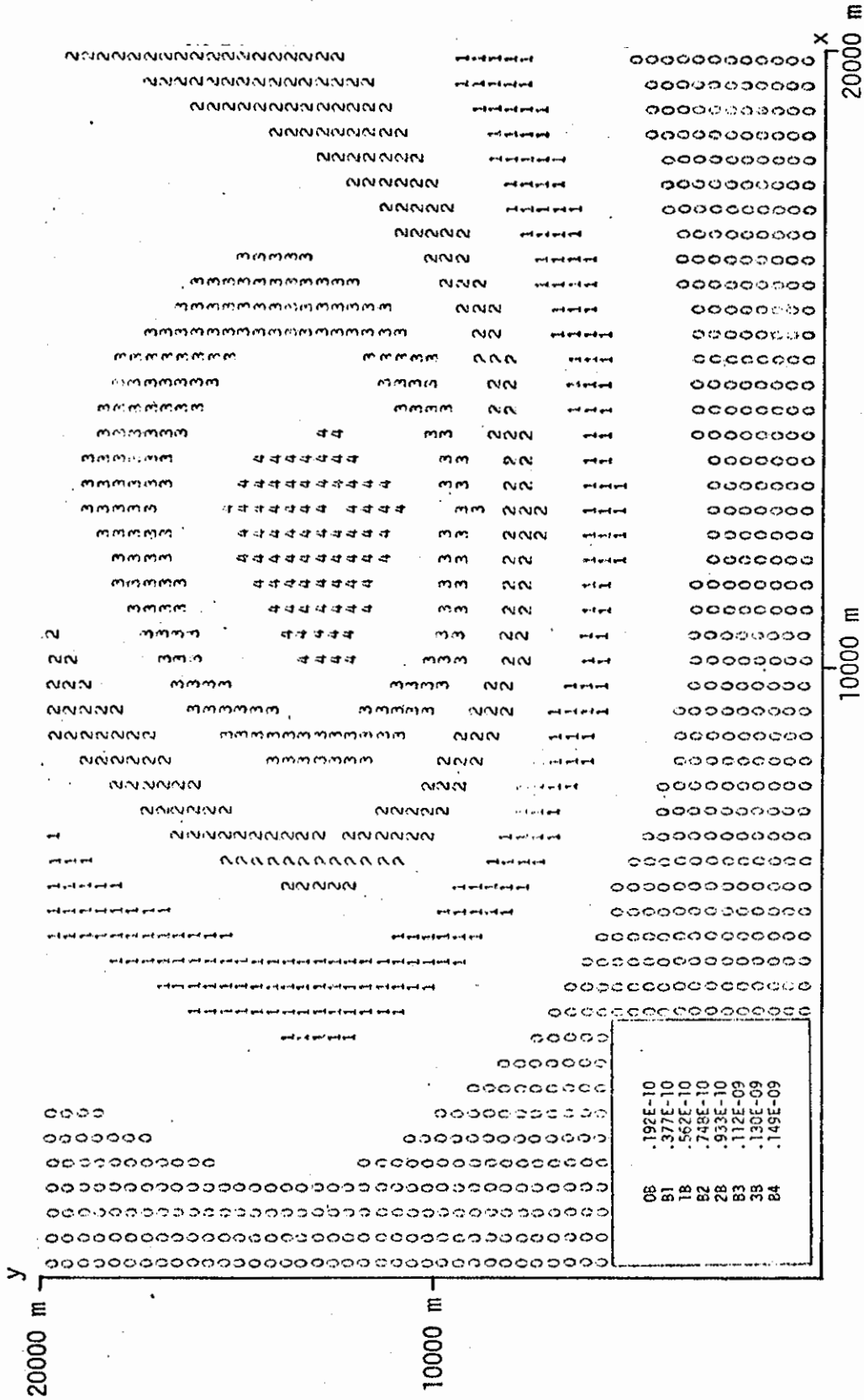


Fig. III.7a - Campos de concentração estimada através do modelo numérico após 24 horas de integração, a 10 metros de altura. (Continua)

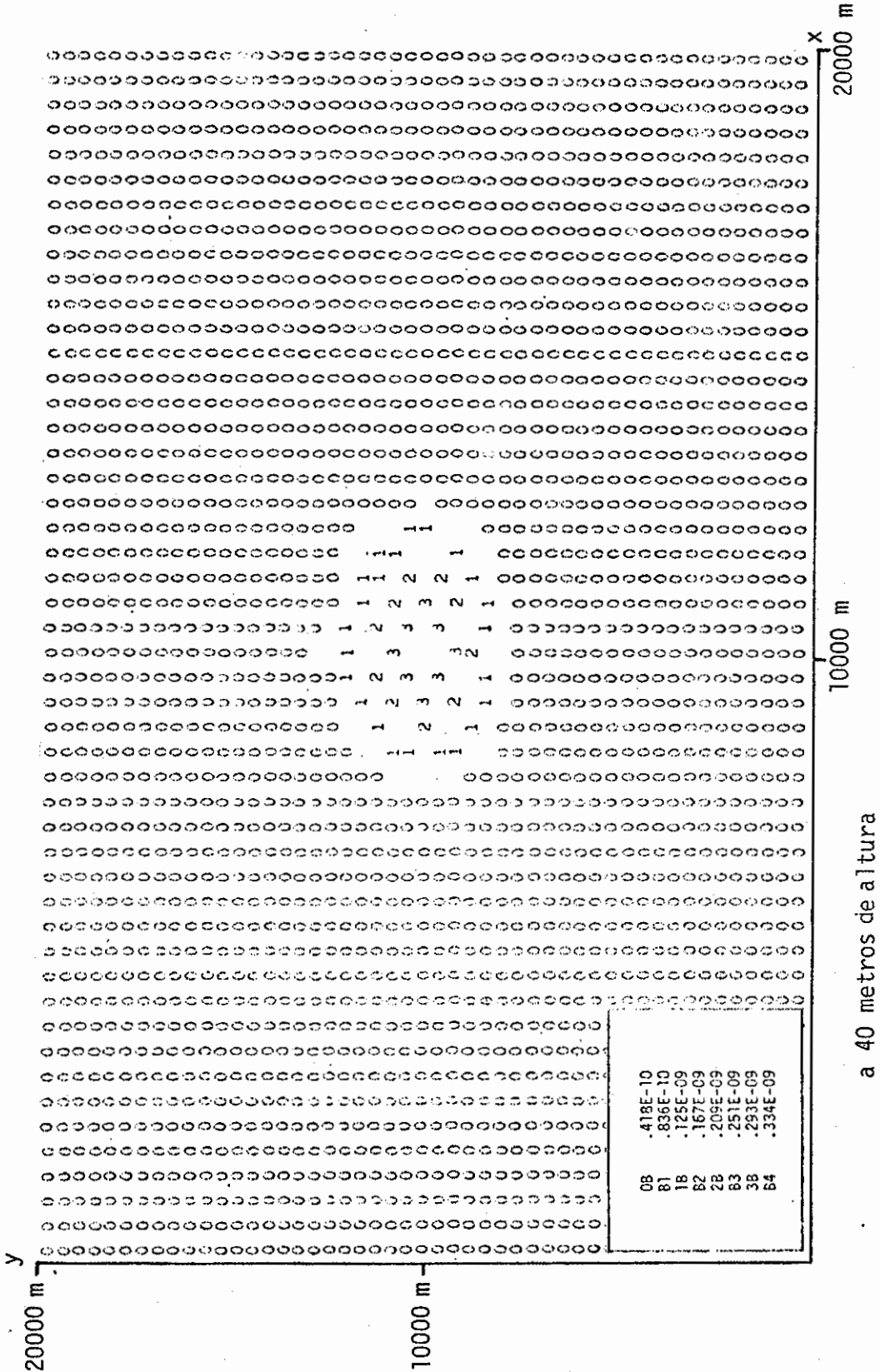
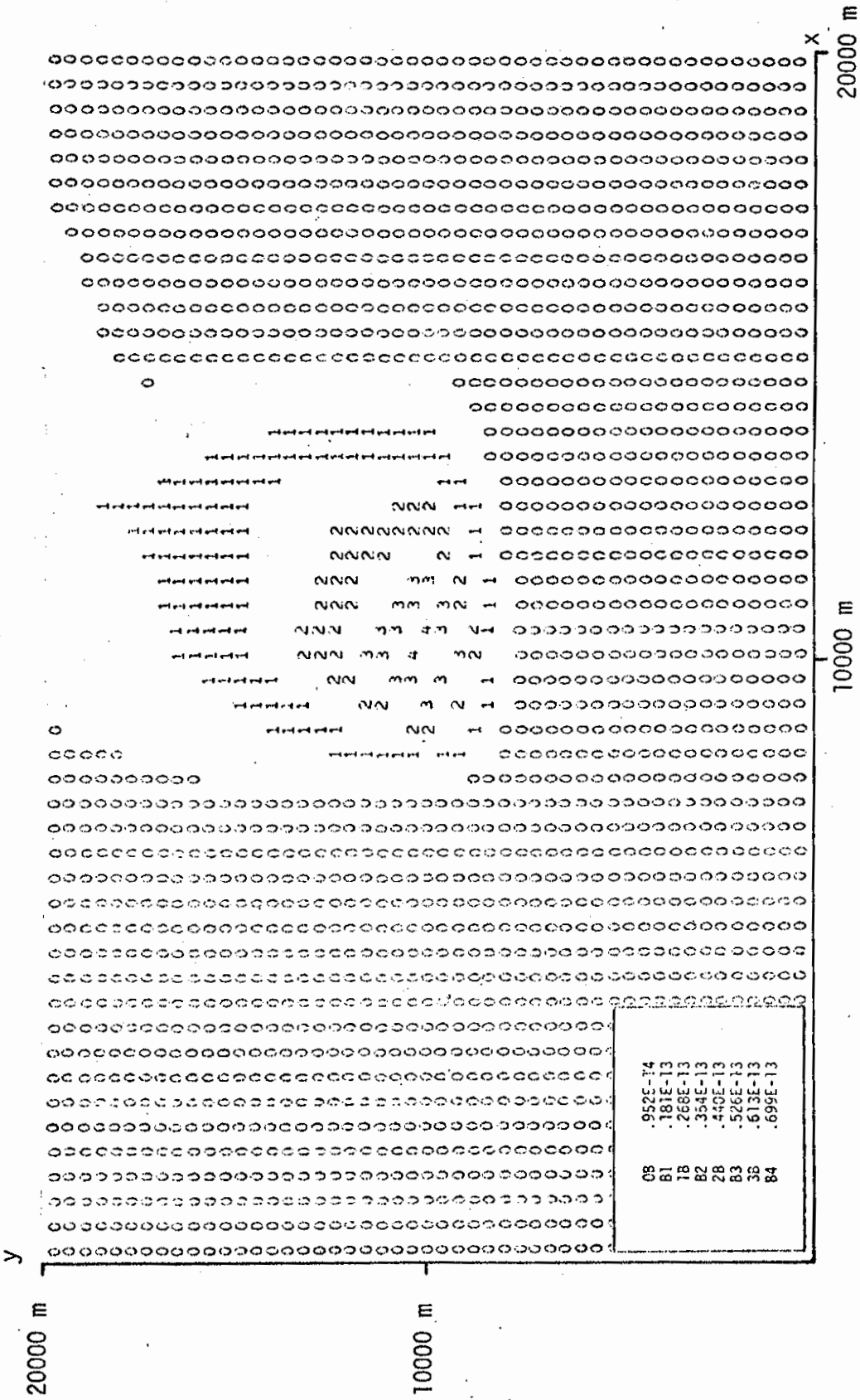


Fig. III.7b - Continuação



a 70 metros de altura

Fig. III.7c - Conclusão

O fluxograma para obtenção desses campos de concentração, usando-se o modelo numérico, pode ser visto na página C.3.

CAPÍTULO IV

COMENTÁRIOS E SUGESTÕES

Foram utilizados dois métodos para a estimativa de concentração de efluentes eliminados por uma fonte pontual contínua. O primeiro é a formulação da Pluma Gaussiana, largamente utilizada em problemas de difusão quando se têm velocidades de vento superiores a 1 m/s. Embora essa formulação forneça resultados satisfatórios, ela apresenta restrições quando usadas para baixas velocidades do vento (Pasquill, 1974).

O segundo é um modelo numérico tridimensional que forneceu bons resultados para baixas velocidades do vento. Neste esquema, para velocidades maiores que 1 m/s, aparecem problemas relativos ao tamanho da grade, incremento de tempo e tempo de processamento.

Em um esquema numérico aplicado a uma fonte pontual, deve-se inicialmente levar em conta que altas velocidades do vento estão associadas a condições próximas à neutralidade, o que implica pequenos espalhamentos de pluma quando comparados com outros de categorias mais instáveis. Nesse caso, é necessário trabalhar com espaços-grade muito pequenos (10^2 m) no plano horizontal, o que por sua vez exige um incremento de tempo também pequeno (10^0 seg). Nestas condições, para manter uma grade tridimensional de tamanho razoável para estudo em escala micrometeorológica (por exemplo, a grade em estudo tem no mínimo $20 \times 20 \times 0,10$ km), é necessário um tempo de máquina bastante elevado; no computador Burroughs 6700, o tempo de processamento é pouco inferior ao tempo de integração, o que não é de interesse prático.

Um estudo desta natureza requer análise detalhada e bastante cuidado no que se refere à dimensão da grade, ao passo de tempo de integração e à velocidade do vento, cuidado esse, que se não for seguido, provocará problemas de instabilidade computacional (Ritchmyer e Morton, 1967).

Foram feitos alguns testes de sensibilidade, que incluíram diferentes valores de: tamanho de grade, incremento de tempo e velocidade de do vento, com resultados dentro do esperado.

Quanto às condições de contorno, foram usadas experimentalmente duas formas que satisfaziam a condição de laplaceano nulo: a primeira, com a concentração variando linearmente entre o contorno e o ponto imediatamente anterior; esta não ofereceu resultados consistentes. A segunda foi uma solução do tipo "patamar", onde a concentração no contorno é igual à do ponto imediatamente anterior; segundo o seu eixo de orientação, esta foi a forma utilizada.

Este modelo é flexível o suficiente para se atualizar os dados de entrada em qualquer instante da integração, e, além de admitir a variação com o tempo das condições de estabilidade da atmosfera e da altura da base da camada de inversão, permite a introdução de outras fontes dentro da região em estudo. No caso de várias fontes, os valores de velocidade de vento eventualmente podem ser maiores que 1 m/s.

No modelo numérico não foi levado em consideração o problema da difusão numérica.

Finalmente, deve-se salientar que este trabalho pretende ser uma primeira versão de um modelo numérico em três dimensões para estimativa de concentração de efluentes lançadas na atmosfera por uma fonte pontual contínua, e também que, para uma comprovação definitiva do modelo, seria necessário um experimento de campo, coletando-se dados de concentração para comparação com os resultados obtidos. Tendo-se em vista estas considerações, para velocidades de vento até 1 m/s usou-se o modelo numérico, e para velocidades acima deste valor, a formulação da Pluma Gaussiana.

Seguem abaixo algumas sugestões para implementação do modelo numérico apresentado.

Inicialmente deve ser levada em conta a introdução da topografia local - o que demanda uma teoria conveniente do comportamento da altura da base da camada de inversão de acordo com a topografia, ou o uso de radiossondas em diversos pontos da área com uma frequência diária alta, para a determinação de perfis de temperatura.

É interessante considerar, também, o regime de brisas numa região como a que foi estudada, onde tem-se interface oceano-continente, uma vez que a construção de futuras usinas nucleares está sendo cogitada para regiões de características físicas semelhantes.

Outro aspecto que deve ser considerado é o decaimento e a deposição do material emitido pela fonte, embora, segundo Moura et alii (1979), a Nuclear Regulatory Commission não reconheça cálculos que envolvam o decaimento durante o tempo de voo, e nem o empobrecimento da nuvem radioativa devido à deposição do material sobre a superfície.

Cabe ressaltar ainda que um sério problema encontrado, quando se aplicou o modelo numérico à região de Angra dos Reis, foi a concentração de estações de coleta de dados numa região muito pequena da grade de análise, o que dificultou a extrapolação dos dados de vento para o resto do campo, e fez com que os valores dos pontos mais distantes dessas estações se tornassem pouco confiáveis. Em vista disto, para futuras aplicações sugere-se um planejamento na distribuição das estações de coleta de dados meteorológicos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

Ao Instituto de Pesquisas Espaciais, na pessoa de seu Diretor Dr. Nelson de Jesus Parada, e ao Dr. Luiz Gylvan Meira Filho, Chefe do Departamento de Meteorologia, o apoio.

Ao Dr. Luiz Carlos Baldicero Molion a valiosa orientação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Engenheiro Wolodymir Boruszewski o constante e precioso auxílio na parte computacional.

À Aparecida dos Santos e Gabi Gama a datilografia e montagem, e a todos que, direta ou indiretamente, auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRAESTRUP, C.B.; WYCKOFF, H.O. *Radiation protection*. Springfield, VA, Charles C. Thomas, 1958. Apud Slade (1968).
- BUSINGER, J.A.; WYNGAARD, J.C.; IZUMI, Y.; BRADLEY, E.F. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28(3):181-189, March 1971.
- DELLA SANTINA, M. *Determinação das zonas de segurança da central nuclear de Angra dos Reis conforme o modelo de difusão de radiação na atmosfera*. Dissertação e Tese de Mestrado em Engenharia. São Paulo, IEA, 1978.
- EISENBUD, M. *Environmental radioactivity*. New York, NY, Academic, 1973.
- GIFFORD Jr., F.A. Use of routine meteorological observations for estimating atmospheric dispersion. *Nuclear Safety*, 6(2):47-51, June, 1961.
- GOLDER, D. Relations among stability parameters in the surface layer. *Boundary Layer Meteorology*, (3):47-57, March 1972.
- HOLLAND, J.Z. *Meteorological survey of the Oak Ridge area*. USAEC Report ORO-99, 1953.
- KUNG, E. Derivation of roughness parameters from wind profile data above tall vegetation. In: LETTAU, H.H. *Studies of the three-dimensional structure of the planetary boundary layer*. Wisconsin, University of Wisconsin, Department of Meteorology, 1961. cap. 3, p. 27-35.
- MOURA, C.N.; AMORIN, E.S.; PANETTA, J. *Dispersão de radionuclídeos na atmosfera*. São José dos Campos, CTA, IAE-EAV, 1979.
- PASQUILL, F. The estimation of the dispersion of windborne material. *The Meteorological Magazine*, 90(1063):33-49, Feb. 1961.
- . *Atmospheric diffusion*. Chichester, Ellis Horwood, 1974.

- RASMUSSEN, N.C. *Reactor safety study: an assesment of accident risks in U.S. commercial nuclear power plants*. Washington, D.C., U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1975.
- RITCHMYER, R.D.; MORTON, K.W. *Difference methods for initial-value problems*. New York, NY, Interscience, 1967.
- SHIR, C.C. A preliminary numerical study of atmospheric turbulent flows in the idealized planetary boundary layer. *Journal of the Atmospheric Science*, 30(10):1327-1339, Oct. 1973.
- SHIR, C.C.; SHIEH, L.J. A generalized urban air pollution model and its application to the study of SO₂ distributions in the St. Louis metropolitan area. *Journal of Applied Meteorology*, 13(2):185-204, March 1974.
- SIMMONS, R.C. *Furnas Angra site FSAR*. Maryland, NUS Corporation, 1975. (Report 2.3 - Meteorology)
- SLADE, D.H. *Meteorology and atomic energy 1968*. Springfield, VA, United States Atomic Energy Commission, 1968.
- START, G.E.; DICKSON, C.R.; WENDELL, L.L. Diffusion in a canyon within rough mountainous terrain. *Journal of Applied Meteorology*, 14(4): 333-346, April 1975.
- START, G.E.; RICHS, N.R.; DICKSON, C.R. Effluent dilutions over mountainous terrain. In: *SYMPOSIUM ON ATMOSPHERIC TURBULENCE DIFFUSION AND AIR QUALITY*, 3, Raleigh, 1976. sec. 7, p. 407-414, 1976.
- SUTTON, O.G. *Micrometeorology*. New York, NY, McGraw-Hill, 1953.
- TANK, W.G. Comments on "Diffusion in a canyon within rough mountainous terrain". *Journal of Applied Meteorology*, 15(10):1114-1116, Oct. 1976.
- TIBA, C. *Razão de conversão e consumo de material fissil em reatores PWR*. Dissertação e Tese de Mestrado em Ciência e Tecnologia Nucleares. São Paulo, IEA, 1978.

- VOGT, K.J. Empirical investigations of the diffusion of waste air plumes in the atmosphere. *Nuclear Technology*, 34(6):43-56, June 1977.
- WALD, N. Leukemia in Hiroshima City atomic bomb survivors. *Science*, 127(3300):699-700, 1958. Apud Slade (1968).
- WENDELL, L.L. *A preliminary examination of mesoscale wind fields and transport determined from a network of wind towers*. Silver Spring, MD, NOAA, 1970. (NOAA Tech.Memo. ERLTM-ARL 25).
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Effect of radiation on human heredity*. Geneva, Switzerland, 1957.

APÊNDICE A

CAMPOS DE CONCENTRAÇÃO USANDO A FORMULAÇÃO GAUSSIANA

Neste apêndice são apresentados os campos de concentração em três níveis fixos para as categorias: "A", "D" e "F" de Pasquill. Como já foi exposto no Capítulo II, a malha usada para a categoria "A" é diferente das usadas para as categorias "D" e "F". Aqui o eixo "x'" é orientado na direção do vento e tem para a categoria "A" um comprimento de 1000 metros; para as categorias "D" e "F" este comprimento é de 10000 metros. O eixo "y'" é perpendicular a "x'" e tem um comprimento de 500 metros, qualquer que seja a categoria.

CONDIÇÕES DE NEUTRALIDADE -- CATEGORIA D

VALORES DE CONCENTRACAO DE POLUENTES NO NIVEL = 10.

X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀
.10734E-09	.10755E-09	.04319E-10	.42176E-10	.22727E-10	.17319E-10	.13893E-10	.11420E-10	.09741E-11	
.12092E-09	.9441E-10	.6195E-10	.4128E-10	.22032E-10	.17177E-10	.13303E-10	.11360E-10	.95326E-11	
.5530E-10	.7561E-10	.55334E-10	.38501E-10	.28033E-10	.16760E-10	.13538E-10	.11183E-10	.94092E-11	
.13908E-10	.53131E-10	.45947E-10	.34474E-10	.26044E-10	.16004E-10	.13108E-10	.10894E-10	.92072E-11	
.20077E-11	.37702E-10	.29439E-10	.23647E-10	.18734E-10	.15148E-10	.12528E-10	.10502E-10	.89316E-11	
.10000E-12	.15168E-10	.24107E-10	.20505E-10	.16974E-10	.14107E-10	.11202E-10	.10018E-10	.85844E-11	
.79721E-14	.64085E-11	.16003E-10	.16843E-10	.15092E-10	.12600E-10	.11002E-10	.94576E-11	.81866E-11	
.14920E-15	.23145E-11	.10102E-10	.14094E-10	.14308E-10	.13113E-10	.11022E-10	.88350E-11	.77395E-11	
.36674E-17	.71427E-12	.57410E-11	.10090E-10	.11427E-10	.11150E-10	.91862E-11	.74175E-11	.72515E-11	
.31594E-19	.18554E-12	.30550E-11	.65737E-11	.92741E-11	.89110E-11	.82310E-11	.74717E-11	.67356E-11	
.16519E-21	.44589E-13	.14749E-11	.44949E-11	.75553E-11	.78248E-11	.72799E-11	.67639E-11	.62023E-11	

VALORES DE CONCENTRACAO DE POLUENTES NO NIVEL = 50.

X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀
.2004E-09	.90345E-10	.57220E-10	.30309E-10	.27875E-10	.21129E-10	.16603E-10	.13422E-10	.9347E-11	
.20224E-09	.89121E-10	.55155E-10	.37735E-10	.27440E-10	.20901E-10	.16469E-10	.13336E-10	.93032E-11	
.88248E-10	.70433E-10	.49233E-10	.35283E-10	.26252E-10	.20234E-10	.16069E-10	.13080E-10	.10867E-10	
.22152E-10	.47817E-10	.40791E-10	.3156E-10	.24356E-10	.19170E-10	.15423E-10	.12669E-10	.10586E-10	
.31491E-11	.27515E-10	.31348E-10	.26709E-10	.21930E-10	.17773E-10	.14562E-10	.12108E-10	.10205E-10	
.20579E-12	.13594E-10	.22345E-10	.22046E-10	.19162E-10	.16195E-10	.13526E-10	.11420E-10	.97348E-11	
.12703E-14	.57418E-11	.14735E-10	.17233E-10	.13248E-10	.14317E-10	.12359E-10	.10636E-10	.91898E-11	
.38920E-15	.29734E-11	.90597E-11	.12930E-10	.12440E-10	.11108E-10	.97749E-11	.85844E-11	.79918E-11	
.55251E-17	.64015E-12	.51925E-11	.9202E-11	.14678E-10	.10578E-10	.82223E-11	.68759E-11	.79363E-11	
.50279E-19	.10698E-12	.27102E-11	.62307E-11	.82755E-11	.60018E-11	.65436E-11	.79524E-11	.72602E-11	
.26322E-21	.30134E-13	.13301E-11	.41107E-11	.82741E-11	.71674E-11	.73105E-11	.70336E-11	.65725E-11	

VALORES DE CONCENTRACAO DE POLUENTES NO NIVEL = 100.

X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀
.76378E-10	.59309E-10	.36731E-10	.29090E-10	.22537E-10	.17916E-10	.14557E-10	.12053E-10	.10144E-10	.89508E-11
.59440E-10	.5440E-10	.37594E-10	.28446E-10	.22205E-10	.17723E-10	.14436E-10	.11975E-10	.10091E-10	.86213E-11
.25940E-10	.41210E-10	.33592E-10	.26597E-10	.21229E-10	.17158E-10	.1407E-10	.11745E-10	.99338E-11	.85097E-11
.65117E-11	.27858E-10	.27750E-10	.23750E-10	.19692E-10	.16245E-10	.13521E-10	.11372E-10	.96770E-11	.83270E-11
.78126E-13	.7928E-10	.21328E-10	.20330E-10	.17730E-10	.16245E-10	.1407E-10	.12669E-10	.10869E-10	.9326E-11
.37340E-14	.7928E-11	.1201E-10	.10019E-10	.1542E-10	.15070E-10	.1276E-10	.10869E-10	.9326E-11	.80776E-11
.10267E-15	.35591E-11	.10050E-10	.12990E-10	.1317E-10	.12140E-10	.11658E-10	.10295E-10	.86991E-11	.77682E-11
.1624E-17	.14130E-11	.61626E-11	.9709E-11	.10610E-10	.10548E-10	.10834E-10	.95312E-11	.84009E-11	.7700E-11
.18291E-17	.37451E-12	.34352E-11	.89392E-11	.10582E-11	.10548E-10	.97348E-11	.87816E-11	.78479E-11	.69994E-11
.14792E-19	.90550E-13	.16491E-11	.87421E-11	.69693E-11	.69693E-11	.66108E-11	.6108E-11	.56108E-11	.5509E-11
.77373E-22	.22310E-13	.90402E-12	.30908E-11	.5032E-11	.74635E-11	.74809E-11	.71411E-11	.66369E-11	.60917E-11
					.60777E-11	.64048E-11	.63159E-11	.60082E-11	.56094E-11

CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE - CATEGORIA F

VALORES DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO NÍVEL = 100.

X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
33553E-10	17777E-09	18350E-09	13379E-09	12128E-09	11048E-09	10117E-09	
11298E-10	15294E-09	15294E-09	14965E-09	11928E-09	10826E-09	99489E-10	
43763E-12	12547E-09	12547E-09	12171E-09	10973E-09	10188E-09	94603E-10	
19445E-14	90701E-11	87979E-10	10149E-09	96823E-10	92059E-10	80980E-10	
98008E-10	11335E-11	84388E-10	75667E-10	81265E-10	79884E-10	77345E-10	
37603E-24	72369E-13	38121E-10	51875E-10	64877E-10	60566E-10	66501E-10	
38446E-27	42940E-14	40088E-10	32702E-10	49266E-10	53265E-10	55290E-10	
29349E-33	40795E-16	49121E-11	18957E-10	35584E-10	40929E-10	44452E-10	
25742E-40	4517E-18	39398E-11	10104E-10	28448E-10	30200E-10	34536E-10	
0.	20165E-20	12739E-14	14012E-11	15977E-10	21399E-10	25979E-10	
0.	74129E-23	76010E-16	22321E-12	93099E-11	14561E-10	18806E-10	

VALORES DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO NÍVEL = 50.

X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
24035E-08	31238E-09	23115E-09	18235E-09	12801E-09	11150E-09	9889E-10	
63308E-09	40575E-09	21408E-09	17486E-09	12494E-09	10927E-09	97203E-10	
32362E-10	26136E-09	18312E-09	15819E-09	11581E-09	10282E-09	92430E-10	
14352E-12	12529E-09	13845E-09	12562E-09	10219E-09	92914E-10	84900E-10	
73027E-16	45314E-13	11013E-10	93207E-10	85771E-10	80628E-10	75509E-10	
22551E-20	49540E-12	12094E-10	63900E-10	68475E-10	67184E-10	64974E-10	
28011E-25	13949E-13	23966E-10	40282E-10	47873E-10	53759E-10	54020E-10	
21713E-31	26214E-15	13320E-10	23351E-10	31664E-10	37559E-10	41309E-10	
19015E-35	20018E-17	39294E-13	12847E-10	19653E-10	25603E-10	33764E-10	
0.	14037E-19	32758E-14	6005E-11	11446E-10	21598E-10	25303E-10	
0.	43767E-22	20223E-15	27495E-12	10482E-10	14696E-10	16452E-10	

VALORES DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO NÍVEL = 100.

X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
29445E-11	81733E-10	73056E-10	72049E-10	65883E-10	60227E-10	50902E-10	
99657E-14	6637E-10	73640E-10	6900E-10	63821E-10	56739E-10	50054E-10	
38035E-13	5722E-10	6091E-10	6092E-10	58014E-10	54491E-10	47596E-10	
17157E-13	37344E-10	40213E-10	49395E-10	49447E-10	48082E-10	43765E-10	
52775E-19	20227E-11	30740E-10	36827E-10	39612E-10	40356E-10	35914E-10	
50955E-23	14763E-11	18200E-10	25247E-10	29793E-10	32218E-10	33458E-10	
3344E-29	14400E-12	95903E-11	15916E-10	20972E-10	24485E-10	2817E-10	
25949E-34	56014E-13	11404E-11	92260E-11	13871E-10	20465E-10	22304E-10	
22729E-41	31077E-12	14977E-11	4917E-11	80093E-11	12141E-10	17397E-10	
0.	62203E-21	53999E-15	69740E-12	24103E-11	10700E-10	13071E-10	
0.	22442E-23	34213E-16	23049E-12	10863E-11	72804E-11	95017E-11	

APÊNDICE B

CAMPOS DE CONCENTRAÇÃO USANDO O MODELO NUMÉRICO

Neste apêndice são apresentados os campos de concentração em três níveis variáveis para três instantes diferentes. A malha de 2000 x 2000 metros é a mesma para qualquer campo. O eixo "x" é orientado no sentido oeste-leste, e o eixo "y" no sentido sul-norte; ambos têm um comprimento de 20.000 metros.

DÉCIMA-SEGUNDA HORA DE INTEGRAÇÃO

VALORES DE CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO NÍVEL = 40 m

2535-12	2535-12	8095-12	3535-11	1135-10	2445-10	271F-10	1975-10	1085-10	515-10	335-10	11
2535-12	2535-12	8095-12	3535-11	1135-10	2445-10	271F-10	1975-10	1085-10	515-10	335-10	11
4805-12	4805-12	1725-11	3725-11	2445-10	5595-10	5935-10	4665-10	2145-10	1015-10	1015-10	11
7945-12	7945-12	3725-11	1795-10	2445-10	1205-09	1775-09	755-09	2145-10	1015-10	1015-10	11
7705-12	7705-12	3125-11	1845-10	7955-10	2895-09	1865-09	1045-09	4985-10	2175-10	2025-10	11
3305-13	3305-13	1425-12	5145-11	2425-10	4845-09	5755-09	3445-09	1665-10	17205-11	2025-11	11
2075-13	2075-13	7135-12	1425-12	9285-12	1205-11	1215-10	3445-11	1435-11	4375-11	2025-11	11
5855-14	5855-14	1935-13	7755-13	2285-12	2035-11	2335-11	1025-11	9055-12	4105-12	4105-12	11
		1935-13	7755-13	2285-12	4685-12	5385-12	4105-12	2385-12	1105-12	1105-12	11
		1935-13	7755-13	2285-12	4685-12	5385-12	4105-12	2385-12	1105-12	1105-12	11

VALORES DE CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO NÍVEL = 160 m

2475-12	2475-12	2705-12	2705-12	2755-12	1825-12	1575-11	4355-11	8425-11	1625-11	100-11	00
2475-12	2475-12	2705-12	2705-12	2755-12	1825-12	1575-11	4355-11	8425-11	1625-11	100-11	00
2865-13	2865-13	7755-14	7755-14	9285-14	1425-13	1175-12	1305-12	5995-12	3625-12	3625-12	00
3555-13	3555-13	4575-13	4575-13	1275-13	1495-13	1175-12	1305-12	5995-12	3625-12	3625-12	00
8095-13	8095-13	2735-13	2735-13	2355-13	18505-13	2075-12	7995-12	2395-13	3995-13	3995-13	00
2895-13	2895-13	2235-13	2235-13	2995-13	4275-13	3445-13	4085-13	1225-13	3355-13	3355-13	00
2505-13	2505-13	2335-13	2335-13	2405-13	1945-13	3445-13	4085-13	1225-13	3355-13	3355-13	00
2515-13	2515-13	2335-13	2335-13	2405-13	2375-13	3935-13	5975-13	11205-13	3625-13	3625-13	00
2515-13	2515-13	2335-13	2335-13	2405-13	2375-13	3935-13	5975-13	11205-13	3625-13	3625-13	00

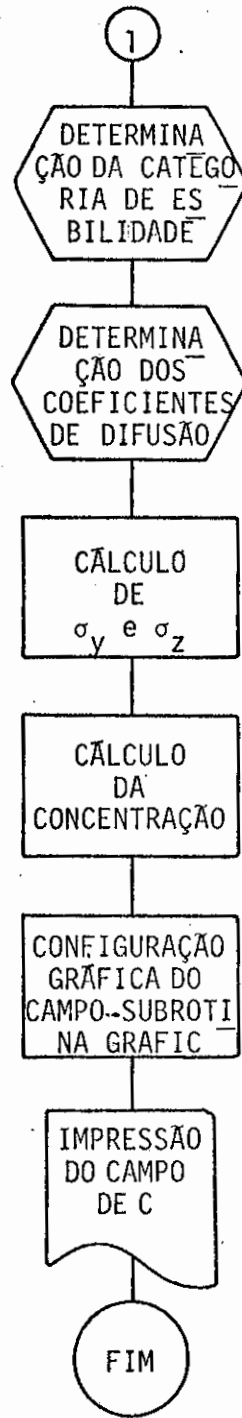
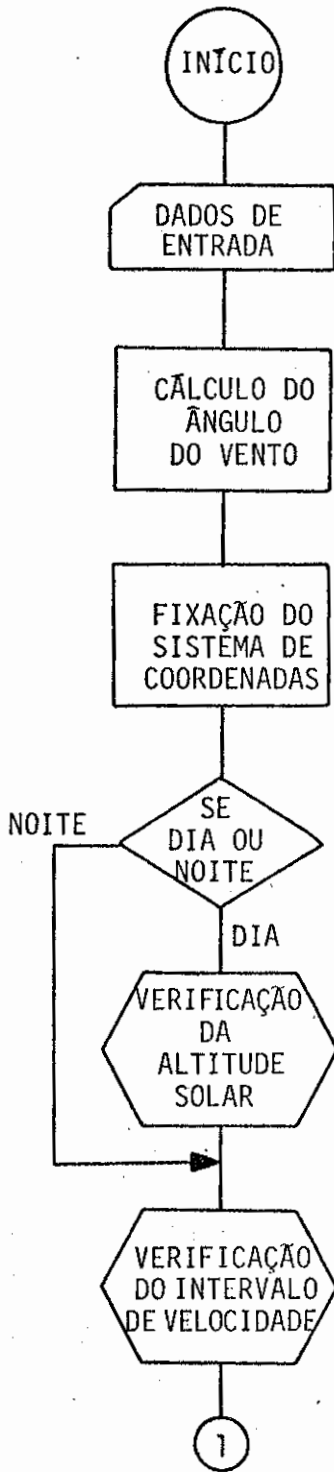
VALORES DE CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES NO NÍVEL = 240 m

1795-14	1795-14	1755-14	1755-14	1605-14	1535-14	2395-14	3925-14	3145-14	1675-14	1075-14	13
1795-14	1795-14	1755-14	1755-14	1605-14	1535-14	2395-14	3925-14	3145-14	1675-14	1075-14	13
1975-14	1975-14	1955-14	1955-14	8705-14	1025-14	4955-14	3225-14	3145-14	1675-14	1075-14	13
7085-15	7085-15	7675-15	7675-15	9115-15	8745-15	4955-14	1575-15	1365-15	1615-15	1615-15	13
2805-15	2805-15	2745-15	2745-15	2325-15	2445-15	3335-15	5965-15	4975-15	3025-15	3025-15	13
3425-15	3425-15	3105-15	3105-15	3035-15	4045-15	3335-15	2265-15	3715-15	6025-15	6025-15	13
3105-15	3105-15	3105-15	3105-15	2835-15	4045-15	3335-15	2265-15	3715-15	6025-15	6025-15	13
3065-15	3065-15	3065-15	3065-15	2835-15	3425-15	2675-15	3005-15	5725-15	6015-15	6015-15	13
3065-15	3065-15	3065-15	3065-15	2835-15	3425-15	2675-15	3005-15	5725-15	6015-15	6015-15	13

APENDICE C

FLUXOGRAMAS

FORMULAÇÃO GAUSSIANA



MODELO NUMÉRICO

