

I

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                           |                                                               |                                                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Classificação INPE-COM.2/NTI<br>C.D.U.: 551.509.313                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                           | 2. Período                                                    | 4. Critério de Distribuição:<br><br>interna <input checked="" type="checkbox"/><br><br>externa <input type="checkbox"/> |
| 3. Palavras Chaves (selecionadas pelo autor)<br><i>Euações Primitivas, Barotrópico, Equação de Balanço, Previsão.</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                           |                                                               |                                                                                                                         |
| 5. Relatório nº<br>INPE-1336-NTI/112                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 6. Data<br>Agosto de 1978 | 7. Revisado por<br><i>Antonio Divino Moura</i>                |                                                                                                                         |
| 8. Título e Sub-Título<br><i>EXPERIMENTOS DE PREVISÃO NUMÉRICA DE TEMPO COM UM MODELO BAROTRÓPICO DE EQUAÇÕES PRIMITIVAS USANDO DADOS TEÓRICOS.</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                           | 9. Autorizado por<br><i>Nelson de Jesus Parada</i><br>Diretor |                                                                                                                         |
| 10. Setor DPM                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Código                    | 11. Nº de cópias 08                                           |                                                                                                                         |
| 12. Autoria<br><i>Marco Antonio Maringolo Lemes</i><br><i>Rosalvo Pinheiro dos Santos</i><br><i>Prakki Satyamurti</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                           | 14. Nº de páginas 97                                          |                                                                                                                         |
| 13. Assinatura Responsável<br><i>Marco Antonio Maringolo Lemes</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                           | 15. Preço                                                     |                                                                                                                         |
| 16. Sumário/Notas<br><i>Um modelo barotrópico de equações primitivas, com coordenadas esféricas, foi desenvolvido e testado com dados hipotéticos do tipo "Ondas de Neamtan" (soluções da equação de vorticidade barotrópica sobre uma esfera, obtidas por Neamtan, em 1946). Em se tratando de um modelo de área limitada, o problema da seleção de condições de contorno, em particular aquelas a serem aplicadas nas fronteiras norte (equador) e sul (45°S) da grade, foi detalhadamente estudado. Duas "Ondas de Neamtan", diferindo essencialmente na distribuição latitudinal da componente meridional da velocidade foram utilizadas em uma série de experimentos numéricos, onde três conjuntos de condições de contorno foram testados. Uma importante conclusão foi que a qualidade da previsão dos campos de massa e movimento das ondas depende intimamente da intensidade do escoamento normal às fronteiras norte e sul, bem como do modo que as tendências das variáveis são calculadas ao longo das mesmas. Em nossos experimentos as condições de contorno usadas por Shuman e Vanderman (1966) e Sing e Saha (1976) foram julgadas serem as mais apropriadas mesmo no caso extremo de grandes valores de v nas fronteiras norte e sul. Descrição dos modelos, incluindo o método de inicialização empregado no tratamento dos dados de entrada e resultados obtidos da integração numérica de duas Ondas de Neamtan serão apresentados.</i> |                           |                                                               |                                                                                                                         |
| 17. Observações                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                           |                                                               |                                                                                                                         |

## ÍNDICE

|                                                 |            |
|-------------------------------------------------|------------|
| ABSTRACT.....                                   | <i>iv</i>  |
| LISTA DE FIGURAS.....                           | <i>v</i>   |
| LISTA DE TABELAS.....                           | <i>vii</i> |
| 1. INTRODUÇÃO .....                             | 01         |
| 2. O MÉTODO DE INICIALIZAÇÃO.....               | 03         |
| 3. O MODELO DE PREVISÃO .....                   | 06         |
| 3.1 As Equações do Modelo .....                 | 06         |
| 3.2 Domínio de Integração .....                 | 07         |
| 3.3 Sobre as Diferenças Finitas .....           | 08         |
| 3.4 Condições de Contorno .....                 | 10         |
| 3.5 A Integração no Tempo .....                 | 12         |
| 4. INTEGRAÇÃO NUMÉRICA COM DADOS TEÓRICOS ..... | 13         |
| 5. SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS .....            | 18         |
| 5.1 Experimentos com a Onda $p_{13}^{12}$ ..... | 18         |
| 5.2 Experimentos com Onda $p_{15}^{12}$ .....   | 30         |
| 6. CONCLUSÕES .....                             | 34         |
| 7. AGRADECIMENTOS .....                         | 41         |
| BIBLIOGRAFIA .....                              | 42         |
| APÊNDICE A - FIGURAS SUPLEMENTARES .....        | A.1        |

## ABSTRACT

A barotropic primitive-equation model on a spherical grid is developed and tested with hypothetical data of the type of "Neamtan-wave" (solutions of the barotropic vorticity equation on a spherical surface, obtained by Neamtan in 1946). In dealing with limited-area models, the problem of selection of boundary conditions, in particular those at the north (equator) and the south ( $45^{\circ}$  S and  $55^{\circ}$  S) boundaries of the grid, is considered in detail. Two different "Neamtan-waves" (essentially different in the distribution of meridional velocity component) are used in a series of numerical experiments where three different sets of boundary conditions are tested. One important conclusion is that the quality of the forecast fields of mass and momentum, associated with the wave motion depends critically on the intensity of cross-boundary flow in conjunction with the scheme for evaluating the tendencies of the variables at these boundaries. In our experiments the boundary conditions used by Schuman and Vanderman (1966) and Singh and Saha (1976) were found to be more appropriate, even in the case of moderately large  $v$  at the north and south boundaries. Description of the model, including the method of initialization employed in the treatment of the input data, and the results of the numerical integrations obtained are presented.

## LISTA DE FIGURAS

1. Representação esquemática da grade esférica do modelo. As va  
riáveis dependentes são especificadas nos pontos assinalados  
por (.) e suas tendências nos pontos (x)..... 08
2. Ilustração da aplicação das condições de contorno na inicia  
lização (a) conjuntos E e T, b) conjunto S..... 11
3. Amplitude do campo de altura geopotencial, para a integração  
da onda  $P_{13}^{12}$ , com os três tipos de condições de contorno ..... 20
4. Curvas de energia total média para a onda  $P_{13}^{12}$ , para os três  
tipos de condições de contorno testados ..... 21
5. Secção tempo x longitude para a componente meridional v, de  
 $P_{13}^{12}$  mostrando uma linha de fase em a)  $\phi=10^0$  e b)  $\phi=30^0$ S para  
as condições de contorno S.  $\Delta\lambda=25^0$ ..... 23
6. Secção tempo x longitude para a componente meridional v, de  
 $P_{13}^{12}$  mostrando uma linha de fase em a)  $\phi=10^0$  e b)  $\phi=30^0$ S pa  
ra as condições de contorno T.  $\Delta\lambda=25^0$ ..... 24
7. Secção tempo x longitude para a componente meridional v, de  
 $P_{13}^{12}$  mostrando uma linha de fase em a)  $\phi=10^0$  e b)  $\phi=30^0$ S pa  
ra as condições de contorno E.  $\Delta\lambda=25^0$ ..... 25
8. A propagação de uma crista da onda  $P_{13}^{12}$ , para o caso S mos  
trando suas posições em t=0, 24, 48 e 72 horas..... 27
9. A propagação de uma crista da onda  $P_{13}^{12}$ , para o caso T mos  
trando suas posições em t=0, 24, 48 e 72 horas..... 28

|     |                                                                                                                                                                                   |    |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 10. | A propagação de uma crista da onda $P_{13}^{12}$ , para o caso E mostrando suas posições em $t=0, 24, 48$ e $72$ horas.....                                                       | 29 |
| 11. | Amplitude do campo de altura geopotencial, para a <u>in</u> tegração da onda $P_{15}^{12}$ , com os três tipos de condições de contorno .....                                     | 32 |
| 12. | Curvas de energia total para a onda $P_{15}^{12}$ , para os três tipos de condições de contorno testados.....                                                                     | 33 |
| 13. | Secção tempo x longitude para a componente meridional $v$ , de $P_{15}^{12}$ mostrando uma linha de fase em a) $\phi=10^0$ e b) $\phi=30^0S$ para as condições de contorno S..... | 35 |
| 14. | Secção tempo x longitude para a componente meridional $v$ , de $P_{15}^{12}$ mostrando uma linha de fase em a) $\phi=10^0$ e b) $\phi=30^0S$ para as condições de contorno T..... | 36 |
| 15. | Secção tempo x longitude para a componente meridional $v$ , de $P_{15}^{12}$ mostrando uma linha de fase em a) $\phi=10^0$ e b) $\phi=30^0S$ para as condições de contorno E..... | 37 |
| 16. | A propagação de uma crista da onda $P_{15}^{12}$ para o caso S mostrando suas posições em $t=0, 24, 48$ e $72$ horas.....                                                         | 39 |
| 17. | A propagação de uma crista de onda $P_{15}^{12}$ para o caso T mostrando suas posições em $t=0, 24, 48$ e $72$ horas.....                                                         | 40 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Número G ( $\times 10$ ) como Função do Tempo, para $p_{13}^{12}$ ..... | 19 |
| 2. Velocidades de Fase ( $\text{Km H}^{-1}$ ) para $p_{13}^{12}$ .....     | 26 |
| 3. Número G ( $\times 10$ ) como Função do Tempo, para $p_{15}^{12}$ ..... | 31 |
| 4. Velocidades de Fase ( $\text{Km H}^{-1}$ ) para $p_{15}^{12}$ .....     | 38 |



## 1. INTRODUÇÃO

O problema da previsão numérica de tempo (PNT), para o caso específico de latitudes tropicais, requer uma formulação diferente daquela para latitudes médias. Assim, modelos numéricos de relativa simplicidade, como aqueles baseados nas equações filtradas (aproximação quase-geostrófica) e alguns ainda sendo usados operacionalmente para prever o movimento da atmosfera em latitudes médias, tem seu emprego bastante questionável quando se considera regiões tropicais.

Desse modo, modelos que não fazem uso de aproximações inadequadas para latitudes baixas devem ser desenvolvidos, e dentre esses talvez o menos complexo seja o modelo barotrópico de equações primitivas. Não obstante as simplificações inerentes ao modelo, no sentido de não incluir certos mecanismos físicos de importância na dinâmica da atmosfera, ele ainda serve ao propósito de fornecer informações úteis ao meteorologista encarregado de fazer previsões subjetivas. Os produtos de quaisquer modelos de PNT não devem, "pese", ser considerados como a previsão propriamente dita, mas sim informações extras que, adicionadas à experiência do meteorologista, lhe permitam alcançar resultados mais conclusivos e com maior chance de acerto.

O modelo barotrópico de equações primitivas, descrito neste relatório, pode ser usado para prever os campos de movimento horizontal (vento) e da altura geopotencial de uma superfície isobárica na atmosfera livre, i.e., onde os efeitos da fricção podem ser desprezados.

Em se tratando de modelos dessa classe, cuidado especial deve ser tomado na especificação do estado inicial da atmosfera para fins de integração numérica do modelo. Isso é justificado duplamente: primeiro, por serem os modelos altamente sensíveis aos dados de entrada e segundo, por requererem a *especificação simultânea* dos campos de velocidade e de massa (geopotencial). Acelerações espúrias, geralmente grandes, decorrentes do emprego de campos iniciais dessas duas variáveis,



que não estejam dinamicamente ajustados entre si, são em grande parte responsáveis por produzir previsões errôneas. Esse desajuste pode ser devido, por exemplo, a erros inerentes aos métodos de observação desses campos e à análise dos mesmos (obtenção dos valores dos campos nos pontos de grade do domínio de integração, a partir dos valores observados nas estações meteorológicas).

Assim sendo, torna-se necessário garantir a existência de um balanço dinâmico entre as variáveis de entrada. O procedimento, já rotineiro em latitudes extra-tropicais, de se inferir o campo de vento do campo de geopotencial é inadequado para latitudes baixas. Devido às variações temporal e espacial no campo de geopotencial em escala sinótica, nos trópicos serem relativamente pequenas e relativamente grandes os erros de medição (Riehl, 1954), o método de inicialização mais recomendável é o inverso do mencionado acima, ou seja escolher o campo de vento como a variável fundamental e através da equação de balanço, computar o campo ajustado do geopotencial.

A seção 2 descreve o método de inicialização usado na obtenção de um conjunto completo de variáveis dependentes, ou seja o campo inferido do geopotencial e o campo de velocidade observada, desse modo determinado o estado inicial da atmosfera no modelo de previsião propriamente dito. Esse, juntamente com os esquemas de diferenças finitas e de integração numérica, é apresentado na seção 3.

Para propósitos de avaliação do desempenho do modelo numérico, achou-se conveniente usar um campo inicial teórico, cujo comportamento temporal seja conhecido. No presente trabalho, o modelo de equações primitivas é testado com "ondas de Neamtan", que constituem soluções da equação da vorticidade barotrópica, não divergente sobre a esfera. Esses testes de verificação também serviram ao propósito de selecionar o conjunto de condições de contorno mais adequado para o domínio de integração de área limitada. Os experimentos numéricos dessa fase são descritos na seção IV desse relatório.

## 2. O MÉTODO DE INICIALIZAÇÃO

Foi usado um método de inicialização estático, cuja essência consiste em obter o campo de geopotencial a partir do vento observado, empregando a conhecida equação de balanço (Haltiner, 1971, por exemplo). Como essa equação utiliza somente a parte rotacional do vento, torna-se necessário, como passo inicial, obter a função de corrente para a área de integração, bastando para isso resolver a seguinte equação de Poisson:

$$\nabla^2 \psi = \hat{k} \cdot (\nabla \times v) \quad (1)$$

Essa equação, de natureza elíptica, exige para a sua resolução o conhecimento da função  $\psi$  (problema de Dirichlet) ou de sua derivada normal (problema de von Neumann) na fronteira do domínio de integração.

A obtenção de  $\psi$  no contorno é feita usando o método sugerido por Hawkins e Rosenthal (1965), o qual é baseado no teorema de Helmholtz da decomposição do vento observado em suas partes rotacional e divergente. Matematicamente:

$$v = \hat{k} \times \nabla \psi + v_d \quad (2)$$

onde  $v$  é o vetor velocidade horizontal,  $\hat{k}$  o vetor vertical e  $\chi$  o potencial de velocidade. A equação (1) é obtida aplicando o operador  $\nabla \cdot$  à equação (2).

Analogamente, uma segunda equação de Poisson é obtida aplicando o operador  $\nabla \cdot$  à equação (2), resultando:

$$\nabla^2 \chi = \nabla \cdot v \quad (3)$$

que  $\bar{\epsilon}$  é resolvida, usando o método de relaxação simultânea de Liebman, fazendo  $\chi = 0$ , arbitrariamente, no contorno.

Seja  $s$  uma coordenada tangencial à fronteira, positiva no sentido oposto do relógio, e  $\hat{n}$  o versor normal ao contorno, positivo quando apontado para fora. As componentes de (2) nessas duas direções são:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial s} = -v_n + \frac{\partial \chi}{\partial n} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial n} = v_s - \frac{\partial \chi}{\partial s} \quad (5)$$

onde  $v_n$  e  $v_s$  são, respectivamente, as componentes da velocidade normal e tangencial ao contorno.

Lembrando que (3) fornece o campo de  $\chi$  para todos os pontos do domínio de integração, a derivada normal  $\partial \chi / \partial n$  é calculada para os pontos internos adjacentes à fronteira externa (contorno interno), usando diferenças finitas centradas. Desse modo, é possível calcular  $\partial \Psi / \partial s$  nesses pontos de contorno, usando (4).

O próximo passo consiste na integração de (4) ao longo do contorno interno, bastando designar a um ponto desse contorno um valor arbitrário, zero por exemplo. Com esses valores, a equação (1) é agora relaxada, resultando nos valores de  $\Psi$  nos pontos internos ao contorno interno.

Com o uso de (5) a derivada  $\partial \Psi / \partial n$  é calculada ao longo do contorno interno e, diferenças finitas centradas, seus valores no contorno externo são obtidas; os quatro valores de canto são obtidos tomando a média aritmética dos dois pontos adjacentes, na fronteira externa.

Mais uma vez, a equação (1) é relaxada usando os novos valores de contorno (externo) de  $\Psi$ . Esse novo campo de  $\Psi$ , assim conseguido do substitui o anteriormente calculado e é usado na equação de balanço, expressa abaixo:

$$\nabla^2 h = - \frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial x} \left[ u_{\Psi} \frac{\partial u_{\Psi}}{\partial x} + \Psi \frac{\partial u_{\Psi}}{\partial y} - \frac{u_{\Psi} v_{\Psi} \tan \phi}{a} - f v_{\Psi} \right] -$$

$$- \frac{1}{g} \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial y} \left[ \cos \phi \left( u_{\Psi} \frac{\partial v_{\Psi}}{\partial x} + v_{\Psi} \frac{\partial v_{\Psi}}{\partial y} + \frac{u_{\Psi}^2}{a} \tan \phi + f u_{\Psi} \right) \right] \quad (6)$$

onde  $h$  é a altura geopotencial,  $g$  a aceleração da gravidade,  $a$  o raio da Terra,  $f$  o parâmetro de Coriolis ( $2 \Omega \sin \phi$  sendo  $\Omega$  a rotação da Terra) e  $\phi$  a latitude. Aqui  $\partial x = a \cos \phi \partial \lambda$  e  $\partial y = a \partial \phi$ ,  $\lambda$  sendo a longitude  $u_{\Psi}$  e  $v_{\Psi}$  são as componentes zonal e meridional da parte não divergente do vento, dadas respectivamente por:

$$u_{\Psi} = - \frac{1}{a} \frac{\partial \Psi}{\partial \phi} \quad \text{e} \quad v_{\Psi} = \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial \Psi}{\partial x}$$

A solução da equação de balanço depende do conhecimento da variável  $\phi$  ao longo da fronteira do domínio de integração, e, ao contrário das equações de Poisson até agora citadas, esses valores não são arbitrariamente escolhidos, mas vão depender, por sua vez, do tipo de condições de contorno.

Como condições de contorno, a serem aplicadas nas fronteiras este e oeste, foram usadas aquelas cíclicas como em Krishnamurti (1966), porém generalizadas no sentido de se poder escolher o número de colunas a serem interpoladas e o grau dos polinômios de interpolação. A descrição detalhada da subrotina COINCIC, que executa essa função, será dada na segunda parte desse relatório, que contém os experi

mentos feitos com dados reais. Nessa parte 1, dados hipotéticos, tipo onda, já satisfazem naturalmente essas condições de contorno e a sub-rotina CONCINC não é utilizada.

Maiores dificuldades foram encontradas na escolha das condições de contorno mais apropriadas às fronteiras norte e sul. Por uma questão de consistência, essas condições são empregadas quer na inicialização, quer no modelo de previsão propriamente dito. Três diferentes conjuntos de condições de contorno foram testados e são descritos na seção seguinte.

Nos experimentos com dados teóricos, a função de corrente  $\psi$  é especificada analiticamente e, portanto, a parte do processo de inicialização onde a componente não divergente do verso é calculada é omitida.

### 3. O MODELO DE PREVISÃO

#### 3.1 AS EQUAÇÕES DO MODELO

As equações do modelo barotrópico de equações primitivas, em coordenadas esféricas, são:

$$\frac{Du}{Dt} - \left(f + \frac{u}{a} \tan \phi\right) v = -g \frac{\partial h}{\partial x} \quad (8)$$

$$\frac{Dv}{Dt} + \left(f + \frac{u}{a} \tan \phi\right) u = -g \frac{\partial h}{\partial y} \quad (9)$$

$$\frac{Dh}{Dt} + h \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{v}{a} \tan \phi \right) = 0 \quad (10)$$

com:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial}{\partial \phi}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \equiv \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \equiv \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \phi}$$

onde (u,v) são as componentes zonal e meridional da velocidade horizontal, h a altura do geopotencial, g a aceleração da gravidade, a raio da Terra  $f = 2 \Omega \sin \phi$ , o parâmetro de Coriolis, e  $\lambda$  e  $\phi$  a longitude e latitude, respectivamente.

As equações (8) e (9) são as componentes da equação vetorial do movimento e, juntamente com (10), a equação de continuidade de massa para um fluido incompressível, são usadas para se calcular as tendências das três variáveis dependentes u, v, h, supondo que seus valores em algum tempo inicial sejam conhecidos.

### 3.2 DOMINIO DE INTEGRAÇÃO

Essas equações são aproximadas por equações de diferenças finitas, o que exige a discretização das duas dimensões espaciais no domínio de integração.

Os incrementos de distância linear  $\Delta x$  e  $\Delta y$ , a serem usados nos esquemas de diferenças finitas, são:

$$\Delta x = a \cos \phi \Delta \lambda$$

$$\Delta y = a \Delta \phi$$

onde  $\Delta \lambda$  e  $\Delta \phi$  são os incrementos de distância angular ao longo de um círculo de latitude e de um meridiano, respectivamente.

Os pontos de grade, nos quais os valores das variáveis dependentes são conhecidos ou calculados, são aqueles formados pelas intersecções de arcos de círculos de latitude e de meridiano, como mostrado na Figura 1. O domínio de integração é a área delimitada pelas latitudes  $\phi_s$  e  $\phi_n$  e as longitudes  $\lambda_w$  e  $\lambda_e$ .

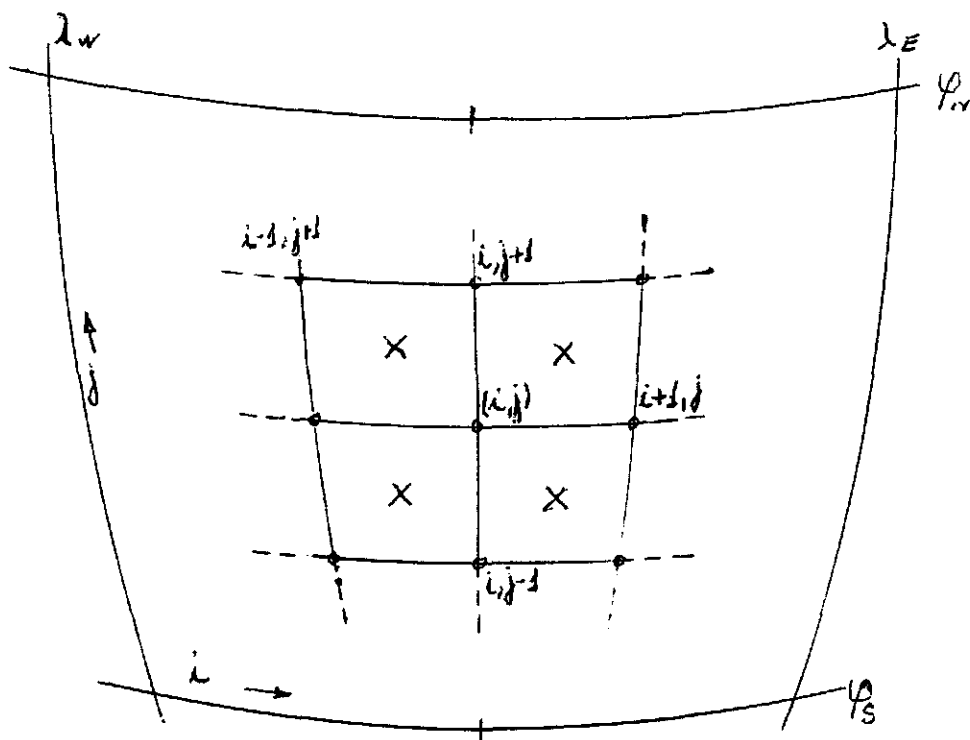


Fig.1 - Representação esquemática da grade esférica do modelo. As variáveis dependentes são especificadas nos pontos assinalados por (.) e suas tendências nos pontos (x).

A grade consiste de  $IM \times JM$  pontos, sendo que o ponto (1,1) corresponde ao canto inferior esquerdo. O domínio esférico de integração difere para os vários experimentos numéricos (dados teóricos e reais) e é indicado juntamente com a discussão dos resultados obtidos.

### 3.3 SOBRE AS DIFERENÇAS FINITAS

Na descrição da formulação das diferenças finitas, foi adotada a seguinte convenção:

$$\left[ f_x \right]_{i+\frac{1}{2}} = \frac{f_{i+1} - f_i}{x_{i+1} - x_i} \quad \text{e} \quad \left[ \overline{f}^x \right]_{i+\frac{1}{2}} = \frac{f_i + 1 + f_i}{2}$$

onde  $f$  representa uma variável qualquer definida discretamente nos pontos  $x_i = i\Delta x$ .

Assim sendo, o esquema de diferenças finitas usado aproximar as derivadas espaciais em (8) - (10) é aquele denominado "semi-momentum" por Shuman (1962) e posteriormente empregado por Shuman e Vanderman (1966) e Vanderman (1969). As formas em diferenças finitas das equações de previsão são:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \overline{\overline{u}^x}^y u_x^y - \overline{\overline{v}^y}^x u_y^x + \overline{f\overline{v}^x}^y + \frac{\overline{\overline{u}^x}^x \overline{\overline{v}^x}^y}{a} \tan \phi - g \overline{h}^y_x \quad (11)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = - \overline{\overline{u}^x}^y v_x^y - \overline{\overline{v}^y}^x v_y^x - \overline{f\overline{u}^x}^y - \frac{\overline{\overline{u}^x}^x \overline{\overline{u}^x}^y \tan \phi}{a} - g \overline{h}^x_g \quad (12)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \overline{\overline{u}^x}^y h_x^y - \overline{\overline{v}^y}^x h_y^x - \overline{h^x}^y u_x^y - \overline{h^y}^x v_y^x + \frac{\overline{h^x}^x \overline{\overline{v}^x}^y \tan \phi}{a} \quad (13)$$

onde de acordo com a convenção acima, o termo  $\overline{\overline{v}^y}^x v_y^x$ , por exemplo, representa:

$$\left[ \overline{\overline{v}^y}^x v_y^x \right]_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} (v_{i+1}^{j+1} + v_{i+1}^j) \left( \frac{v_{i+1}^{j+1} - v_{i+1}^j}{\Delta y} \right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} (v_{i-1}^{j+1} + v_{i-1}^j) \left( \frac{v_{i-1}^{j+1} - v_{i-1}^j}{\Delta y} \right) \right]$$



As variáveis dependentes são especificadas nos pontos  $(i, j)$ ,  $1 \leq i \leq IM$  e  $1 \leq j \leq JM$  e suas tendências, calculadas usando (11) e (13), não coincidem com os pontos de grade em ambas as direções.

O valor da tendência de uma variável, para um ponto interno de grade, é obtido tomando-se a média aritmética dos valores nos quatro pontos indicados por  $(x)$  na Figura 1, que o circundam. Os valores das tendências para os pontos que constituem o contorno de grade são dependentes das condições de contorno, a serem descritas em seguida.

### 3.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO

A especificação das condições de contorno, que sejam representativas de uma situação física, e de fácil tratamento numérico para modelos de áreas limitadas, sempre constitui um difícil problema em PNT.

Como já mencionado, três diferentes conjuntos de condições de contorno foram testados. São eles:

- a) CONJUNTO E: O mais óbvio, consistindo em extrapolar linearmente, a partir dos valores internos as tendências das três variáveis para os pontos de grade sobre as fronteiras norte e sul.
- b) CONJUNTO T: A tendência da componente meridional,  $v$ , é mantida constante e igual a zero, nas fronteiras norte e sul.
- c) CONJUNTO S: Idêntico ao conjunto empregado por Shuman (1966) e Sing e Saha (1976).

Nos dois primeiros casos, na fase de inicialização, o valor da derivada normal de  $h$ , i.e.  $\frac{\partial h}{\partial y}$  é calculado para as fronteiras norte e sul ( $j=JM$ ) e sul ( $j=1$ ), usando equação (12). Valores arbitrários (zeros), em dois contornos artificiais (ver Figura 2), servem de valores de

contorno para que a equação de balanço possa ser relaxada, originando assim um campo  $h$  no domínio físico de integração. Com esse campo e mais os valores fixos de  $\frac{\partial h}{\partial y}$  em  $j = 1$  e  $j = JM$ , novos valores de contorno em  $j = 0$  e  $j = JM+1$  são obtidos. O processo é iterativo, sendo executado até que a diferença entre duas iterações sucessivas, para a altura geopotencial em  $j = 1$  e  $j = JM$  seja menor que um valor pré-estabelecido (no caso, 3%).

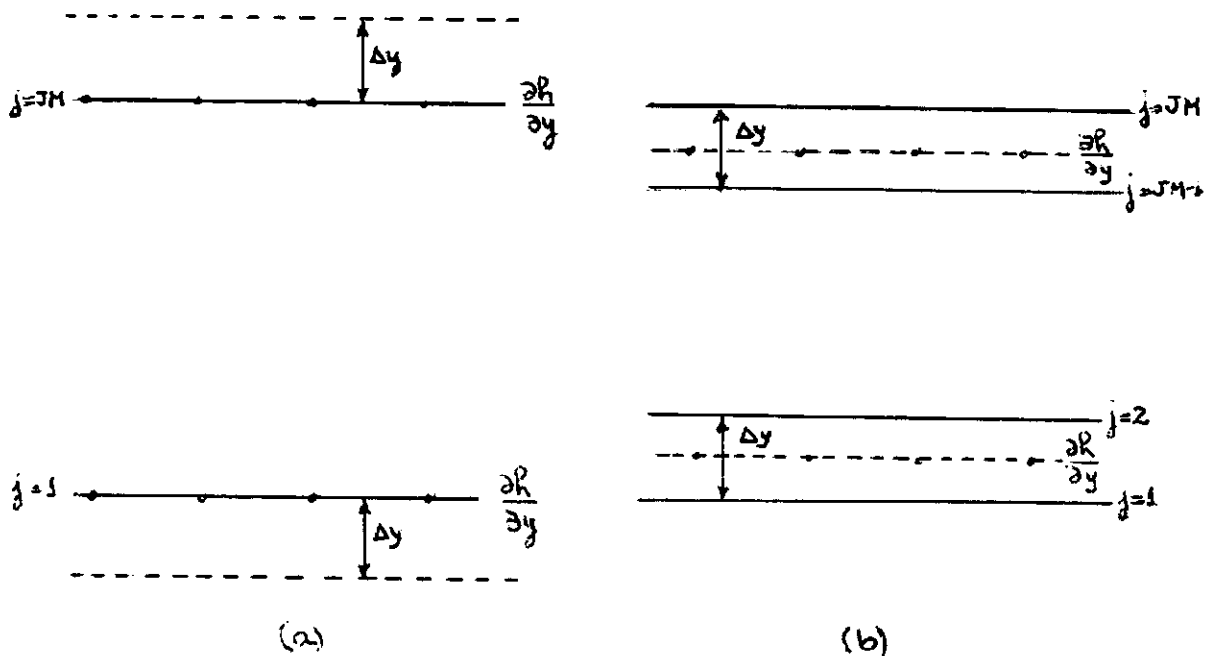


Fig.2 - Ilustração da aplicação das condições de contorno na inicialização (a) conjuntos E e T, (b) conjunto S.

No conjunto S,  $\bar{v}^y$ , nas duas linhas de grade, afastadas de  $\Delta y/2$  das fronteiras norte e sul (Figura 2b), é feito zero, bastando para isso escolher como valores de contorno:

$$v(i,1) = -v(i,2) \quad 1 \leq i \leq IM$$

$$v(i,JM) = -v(i,JM-1) \quad 1 \leq i \leq JM$$

A equação (11), com  $\bar{v}^y=0$  reduz-se a:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \overline{\bar{u}^x}^y u_x - \overline{\bar{h}}^y_x \quad (14)$$

que é usada para calcular a tendência de  $u$  nessas duas linhas intermediárias. Os valores de  $\partial u / \partial t$  em  $j = 1$  e  $j = JM$  são, obtidos por extrapolação linear a partir dos valores dados por (14) e aqueles em  $j = 2$  e  $j = JM-1$ , dados pela equação de previsão (11).

Impondo a condição  $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$  em (12), em adição a  $\bar{v}^y=0$ , tem-se:

$$\bar{h}^x_y = \frac{1}{g} \left[ \overline{f\bar{u}^x}^y + \frac{\bar{u}^x}{a} \overline{\bar{u}^x}^y \tan \phi \right] \quad (15)$$

permitindo, desse modo, a obtenção dos valores de contorno de  $h$ , em  $j = 1$  e  $j = JM$ .

Continuidade cíclica, como condição de contorno nas fronteiras este e oeste é empregada nos três conjuntos.

### 3.5 A INTEGRAÇÃO NO TEMPO

Em algum tempo inicial, os campos das componentes do vento observado e já especificados em todos os pontos de grade, são introduzidos e, através da inicialização, o campo de altura geopotencial é computado. Assim, a especificação do estado inicial da atmosfera para o modelo é completada.

O esquema de integração no tempo é aquele denominado "Euler backward", e consiste das duas seguintes etapas:

$$\begin{aligned} f^* &= f^{(n-1)} + \frac{\partial f^{(n-1)}}{\partial t} \cdot \Delta t \\ f^{(n)} &= f^{(n-1)} + \frac{\partial f^*}{\partial t} \cdot \Delta t \end{aligned} \tag{16}$$

onde  $f$  representa uma variável qualquer, definida em um nível de tempo indicado pelo sobre-índice, e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo, feito igual a 10 minutos.

O intervalo assim escolhido satisfaz o critério de Courant Friedrich-Lewis ie  $\frac{\Delta x}{\Delta t} < \sqrt{2gh_{\max}}$ , uma condição necessária para assegurar a estabilidade computacional em equações hiperbólicas padrões.

Trata-se de um esquema que atenua moderadamente componentes de alta frequência, e, em adição a essa seletividade desejada, não introduz modos computacionais. Apresenta, no entanto, a desvantagem de introduzir acelerações artificiais, relativamente grandes, na propagação de fase (Kurihara, 1965), quando usado na integração numérica da equação hiperbólica mais simples (equação da advecção).

Como não existe uma teoria geral das propriedades de esquemas de diferenças finitas, inclusive análise de estabilidades, aplicadas às equações primitivas em áreas limitadas, é se forçado a fazer experimentos numéricos para uma completa aplicação do modelo. Por essa razão, achou-se conveniente testá-lo com dados hipotéticos de estrutura analiticamente conhecida.

#### 4. INTEGRAÇÃO NUMÉRICA COM DADOS TEÓRICOS

A integração numérica de soluções analíticas, tipo onda, com estruturas e propriedades, como a velocidade de fase, bem conhecidas, serviu ao propósito de testar o modelo barotrópico de equações primitivas.

Neamtan (1946) obteve soluções para a equação não-linear da vorticidade barotrópica que governa o escoamento não-divergente de uma atmosfera homogênea sobre uma esfera. Essas soluções, em termos da função de corrente  $\Psi$  são do tipo:

$$\Psi_{n,m}(\lambda, \phi, t) = -Ba^2 \sin\phi + C P_n(\sin\phi) + A \sin(m\lambda - \nu t) \cdot P_n^m(\sin\phi) \quad (16)$$

onde  $m$  é o número de onda azul e  $\nu$  a frequência angular. Os coeficientes  $A$ ,  $C$  e  $B$ , esse último relacionado com um escoamento básico zonal, são constantes arbitrárias a serem convenientemente especificadas nos experimentos numéricos. O índice  $n$  representa a ordem dos polinômios de Legendre  $P_n$  e das funções associadas de Legendre  $P_n^m$ .

Soluções dadas por (16) serão denominadas "ondas de Neamtan" e são utilizadas nos testes de verificação da construção e de desempenho do modelo, bem como para fornecer indicações sobre as condições de contorno mais apropriadas a serem aplicadas nas fronteiras norte e sul da grade.

A velocidade angular do movimento, obtida da função de corrente tem componentes meridional e zonal, respectivamente, dadas por:

$$\dot{\phi} = \frac{1}{a^2 \cos\phi} \frac{\partial \Psi}{\partial \lambda} = \frac{Am}{a^2 \cos\phi} \cos(m\lambda - \nu t) \times P_n^m(\sin\phi) \quad (17)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{a^2 \cos\phi} \frac{\partial \Psi}{\partial \phi} = \frac{C}{a^2} \frac{d}{d(\sin\phi)} P_n(\sin\phi) - A \frac{A}{a^2} \sin(m\lambda - \nu t) \frac{dP_n^m(\sin\phi)}{d(\sin\phi)} \quad (18)$$

Esse campo de movimento, transformado em velocidade linear através de  $u = a \cos\phi \dot{\lambda}$  e  $v = a \dot{\phi}$  constitui o conjunto de dados de entrada ao modelo de equações primitivas que, nesse caso de divergência zero, é essencialmente equivalente ao modelo de equações filtradas em Neamtan (1946).

A equivalência pode ser mostrada derivando a equação da divergência, a partir das equações primitivas (8) - (10), ou seja:

$$\frac{D}{Dt} (\nabla \cdot \vec{w}) + (\nabla \cdot \vec{w})^2 + T = 0$$

com

$$T = u \frac{\partial f}{\partial y} - f \hat{k} \cdot (\nabla \times \vec{w}) - 2J(u, v) \pm g \nabla^2 h$$

onde  $J(u, v)$  representa o Jacobiano.

O termo  $T$ , acima definido, nada mais é a equação de balanço, em uma outra forma que a já vista, utilizada na obtenção do campo geopotencial, e portanto  $T=0$ . Como, inicialmente, a divergência é nula, segue-se que o movimento permanecerá não-divergente para qualquer tempo.

Deve-se mencionar, no entanto, que os resultados numéricos confirmaram parcialmente essa equivalência, i.e., sugeriram a hipótese que *apenas* um sub-conjunto, do conjunto de soluções da equação da vorticidade barotrópica, é solução das equações primitivas. Em todo caso, esse problema da equivalência merece ser examinado em maiores detalhes e fica, aqui, proposto como um tópico de pesquisa para o futuro.

A relação de dispersão para as ondas de Neamtan (Neamtan 1946) é :

$$\frac{v}{m} = \frac{[n(n+1)-2]}{n(n+1)} \quad B = \frac{2\Omega}{n(n+1)} \quad (19)$$

onde  $\Omega$  é velocidade de rotação da Terra, igual a  $7.293 \times 10^{-5} \text{ rad seg}^{-1}$ .

A área de integração do modelo tem uma extensão longitudinal de  $90^\circ$  e o valor de  $m$ , em todos os testes numéricos, foi escolhido de modo a se ter ondas cujos comprimentos de onda  $L$ ,

$$L = \frac{2\pi a \cos \phi}{m}$$

sejam de escala sinótica; assim para  $m=12$ , tem-se três ondas de aproximadamente 3000 Km no setor de  $90^\circ$  de longitude. O critério de escolha dos coeficientes  $A$ ,  $B$  e  $C$  foi o de se conseguir valores de velocidade comparáveis a aqueles, também de escala sinótica ( $10 \text{ m seg}^{-1}$ ).

Duas séries de experimentos numéricos foram realizadas, utilizando duas ondas de Neamtan, que diferem na distribuição latitudinal da componente  $v$ , afim de examinar o problema da seleção de condições de contorno:  $S$ ,  $T$  e  $E$ , como descritos na secção 3.4).

O desempenho do modelo na simulação da propagação simples das ondas, para os seis casos de teste, foi avaliado estudando o comportamento dos seguintes parâmetros:

a) ENERGIA TOTAL MÉDIA,  $E$ , para a área de integração.

A energia da equação da energia total, em uma coluna de área horizontal unitária, é:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \rho h \left( \frac{1}{2} gh + \frac{\vec{v} \cdot \vec{v}}{2} \right) \right\} = - \nabla \cdot \left\{ \vec{v} \left[ \rho h \left( gh + \frac{\vec{v} \cdot \vec{v}}{2} \right) \right] \right\}$$

que integrada sobre uma área limitada, onde condições de contorno cíclicas na direção este-oeste são usadas, resulta:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \int \left[ \rho h \left( \frac{1}{2} gh + \frac{\vec{v} \cdot \vec{v}}{2} \right) \right] dx dy = - \sum_{n,s} \left\{ v \left[ \rho h \left( gh + \frac{\vec{v} \cdot \vec{v}}{2} \right) \right] \Delta x \right\}_{n,s}$$

Após a aplicação do teorema de Gauss, com a somatória referindo-se aos pontos de grade situados nas fronteiras norte e sul, que no caso específico de ondas teóricas são, individualmente nulos, tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \int \left[ \rho h \left( \frac{1}{2} gh + \frac{v \cdot v}{2} \right) \right] dx dy = 0$$

mostrando que a energia total média para a área de integração deve ser conservada.

b) AMPLITUDE, definida como a diferença entre os valores máximo e mínimo do campo de geopotencial para um certo nível de tempo. Esse parâmetro, como a energia total, deve ser também conservado.

c) NÚMERO G, definido por:

$$G = \frac{\sum |D_{ij}|}{\sum |\zeta_{ij}|}$$

onde  $D_{ij}$  e  $\zeta_{ij}$  são os valores da divergência e vorticidade, respectivamente, e as somatórias estendem-se a todos os pontos de grade. Teoricamente, o número G deve permanecer nulo durante a integração visto serem as ondas de Neamtan soluções não-divergentes da equação da vorticidade.

d) VELOCIDADE DE FASE, média, para o período de integração (72 horas) e que deve ser comparada ao valor teórico dado por:

$$C_f = \frac{2\pi a \cos \phi}{m} \frac{v}{\pi} = \frac{a \cos \phi v}{m} \quad (20)$$



- v) FORMA DA ONDA, visualizada através da sub-rotina ZEBRA (campo escalar reconstituído pela impressora) do campo geopotencial, sendo o único critério subjetivo de avaliação.

## 5 SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS

### 5.1 EXPERIMENTOS COM A ONDA P<sup>12</sup><sub>13</sub>

Essa solução da equação da vorticidade barotrópica apresenta amplitude nula para a função de corrente (e, consequentemente para a de 5) no equador, atingindo um máximo, em valor absoluto em cerca de  $\pm 17.5^{\circ}$  para então decrescer monotonicamente na direção dos polos. A extensão latitudinal do domínio de integração é de  $50^{\circ}$  ( $\phi_n = 0^{\circ}$  e  $\phi_s = 50^{\circ}$ S), resultando em 21 pontos de grade na direção norte-sul, quando o incremento angular é  $2.5^{\circ}$ . Nos experimentos com a onda P<sup>12</sup><sub>13</sub>, os valores das constantes foram os seguintes:  $A = 4 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ,  $B = 2 \times 10^{-6} \text{ rd s}^{-1}$ , e  $C = 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

A Tabela 1 mostra a variação do número G durante a integração, para as três condições de contorno, de hora em hora durante as primeiras 8 horas e de quatro em quatro até o final do período de 72 horas. O número G permanece baixo (0.01 - 0.1) para os três casos, mas sua tendência a aumentar, para o caso das condições E, já é visível nas horas finais do período de integração.

Do ponto de vista de energia (Figura 4), os casos S e T são igualmente satisfatórios em manter constante a energia média total, se bem que no segundo caso, uma oscilação com período de 16 horas está presente. Essa oscilação também está presente na amplitude (Figura 3), de uma maneira óbvia, e é bastante pronunciada mesmo nas últimas horas de integração. O caso E é, claramente, o pior de todos.

TABELA 1

NÚMERO G (x10) COMO FUNÇÃO DO TEMPO, PARA  $P_{13}^{12}$ .

| $P_{13}^{12}$ | TIPOS DE CON. CONTORNO |      |       |
|---------------|------------------------|------|-------|
| HORA          | S                      | T    | E     |
| 00            | 1.182                  | .383 | .383  |
| 01            | .274                   | .213 | .203  |
| 02            | .478                   | .325 | .321  |
| 03            | .313                   | .338 | .334  |
| 04            | .255                   | .369 | .382  |
| 05            | .285                   | .369 | .403  |
| 06            | .225                   | .256 | .318  |
| 07            | .179                   | .180 | .240  |
| 08            | .158                   | .091 | .153  |
| 12            | .209                   | .308 | .392  |
| 16            | .106                   | .096 | .501  |
| 20            | .166                   | .289 | .283  |
| 24            | .090                   | .100 | .325  |
| 28            | .132                   | .242 | .125  |
| 32            | .136                   | .094 | .306  |
| 36            | .098                   | .223 | .233  |
| 40            | .147                   | .106 | .738  |
| 44            | .103                   | .196 | .995  |
| 48            | .123                   | .108 | .870  |
| 52            | .133                   | .183 | .789  |
| 56            | .108                   | .113 | .745  |
| 60            | .126                   | .156 | .494  |
| 64            | .115                   | .114 | .195  |
| 68            | .114                   | .147 | .925  |
| 72            | .126                   | .112 | 1.639 |

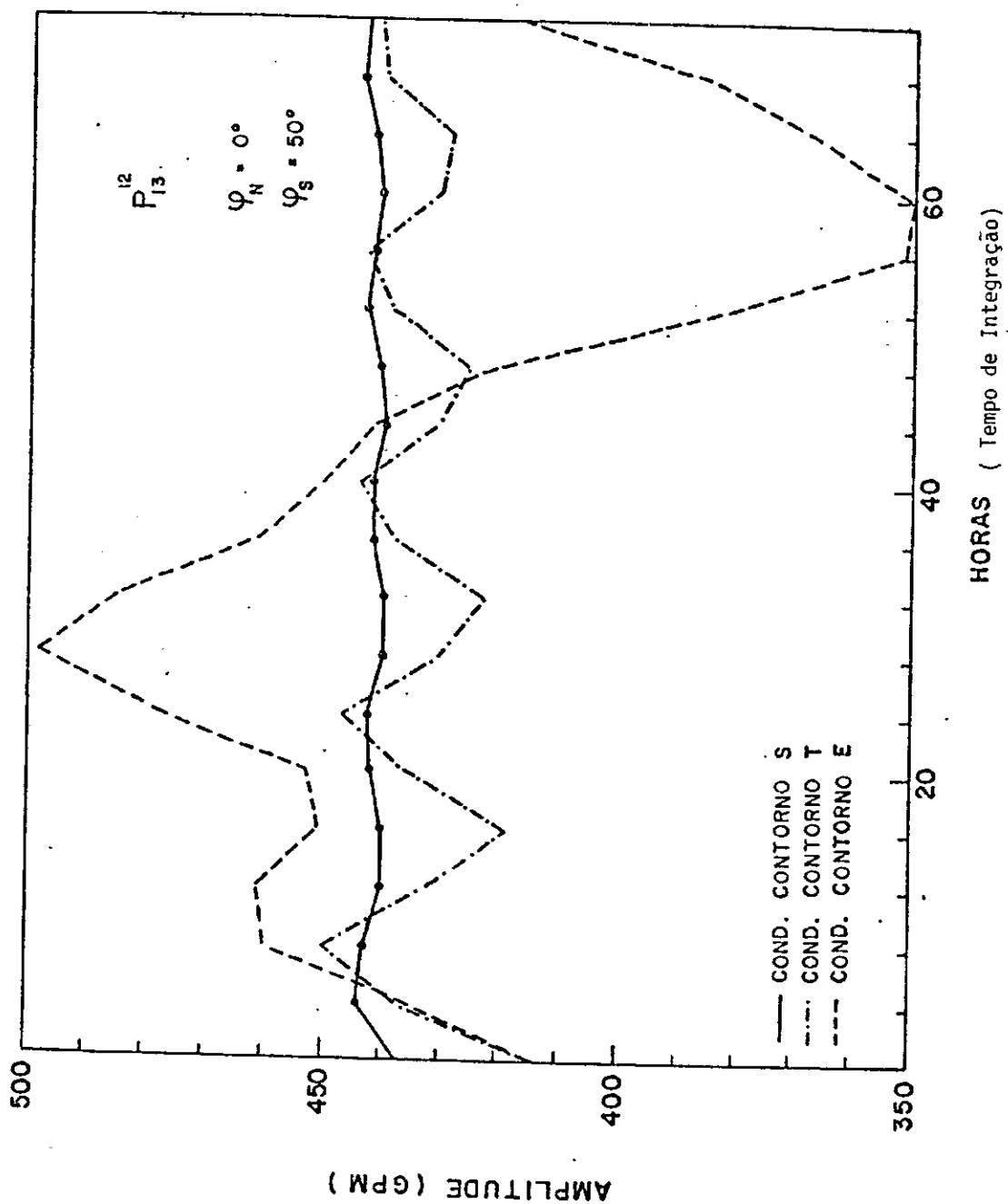


Fig. 3 - Amplitude do campo de altura geopotencial, para a integração da onda  $P_{13}^{12}$ , com os três tipos de condições de contorno.

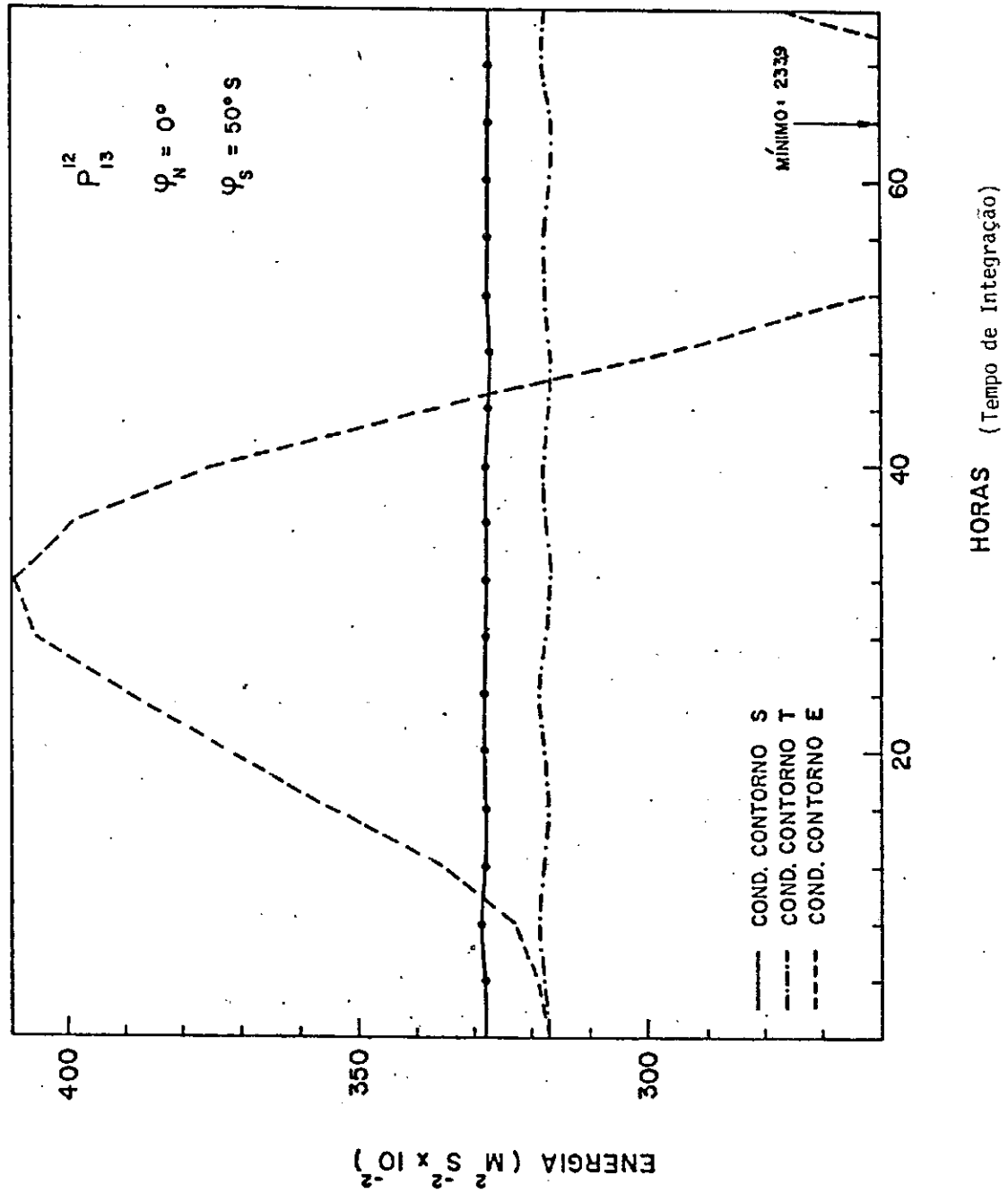


Fig. 4 - Curvas de energia total média para a onda  $P_{13}^{12}$ , para os 3 tipos de condições de contorno testados.

As figuras 5, 6 e 7 mostram linhas de fase constante (pontos nodais, no caso) para as condições S, T e E, respectivamente, em duas latitudes  $\phi=10^{\circ}\text{S}$  e  $\phi=30^{\circ}\text{S}$ . Para uma frequência  $\nu=1416 \times 10^{-5} \text{rd s}^{-1}$  os valores teóricos, calculados usando (20), são  $26.5 \text{ km h}^{-1}$  e  $23.6 \text{ km h}^{-1}$  para essas duas latitudes. A Tabela 2 apresenta as comparações das velocidades da fase.

Os resultados apresentados na Tabela 2 podem ser explicados do seguinte modo. Já foi mencionado que o esquema da integração em tempo ("Euler backward") usado no modelo introduz acelerações positivas, relativamente grandes, na propagação de fase e esse fato é constatado nas variações percentuais nas velocidades de fase (para os três tipos de condições de contorno) em  $\phi=30^{\circ}\text{S}$ , aparentemente pouco afetadas pela presença das fronteiras norte e sul. Por outro lado, as velocidades de fase no modelo para a latitude  $\phi=10^{\circ}\text{S}$  (4 distâncias de grade afastada do contorno norte) mostram variações bem menores, em valor absoluto, sugerindo a possibilidade dos 3 tipos de condições de contorno introduzirem um retardo na propagação de fase. Como consequência, haverá uma inclinação (tilting) na direção noroeste-sudeste, em uma linha nodal, inicialmente na direção norte-sul, como indicado nas Figuras 8, 9 e 10 que mostram, para o campo de geopotencial da onda  $P_{12}^{12}$  e, respectivamente para  $P_{13}^{13}$  as condições S, T e E, as posições de uma linha nodal de 24 em 24 horas.

No processo de relaxação da equação de balanço, a convergência da solução geopotencial para todos os pontos de grade foi alcançada com 102 iterações, para as condições S, e 58 para as T e E. Isso, no caso S, deve-se ao fato de divergências grandes, na direção norte-sul (termo  $\frac{\partial v}{\partial y}$ ) serem impostas artificialmente numa faixa próxima às fronteiras norte e sul. O tempo de computação para uma previsão de 72 horas foi de 18 minutos para as condições S e 17 minutos para as T e E.

Para completar a apreciação dos resultados obtidos, os campos de geopotencial, como impressos pela sub-rotina ZEBRA, são mostrados de 12 em 12 horas no Apêndice A, juntamente com a função de corrente e o termo forçante da equação de balanço.

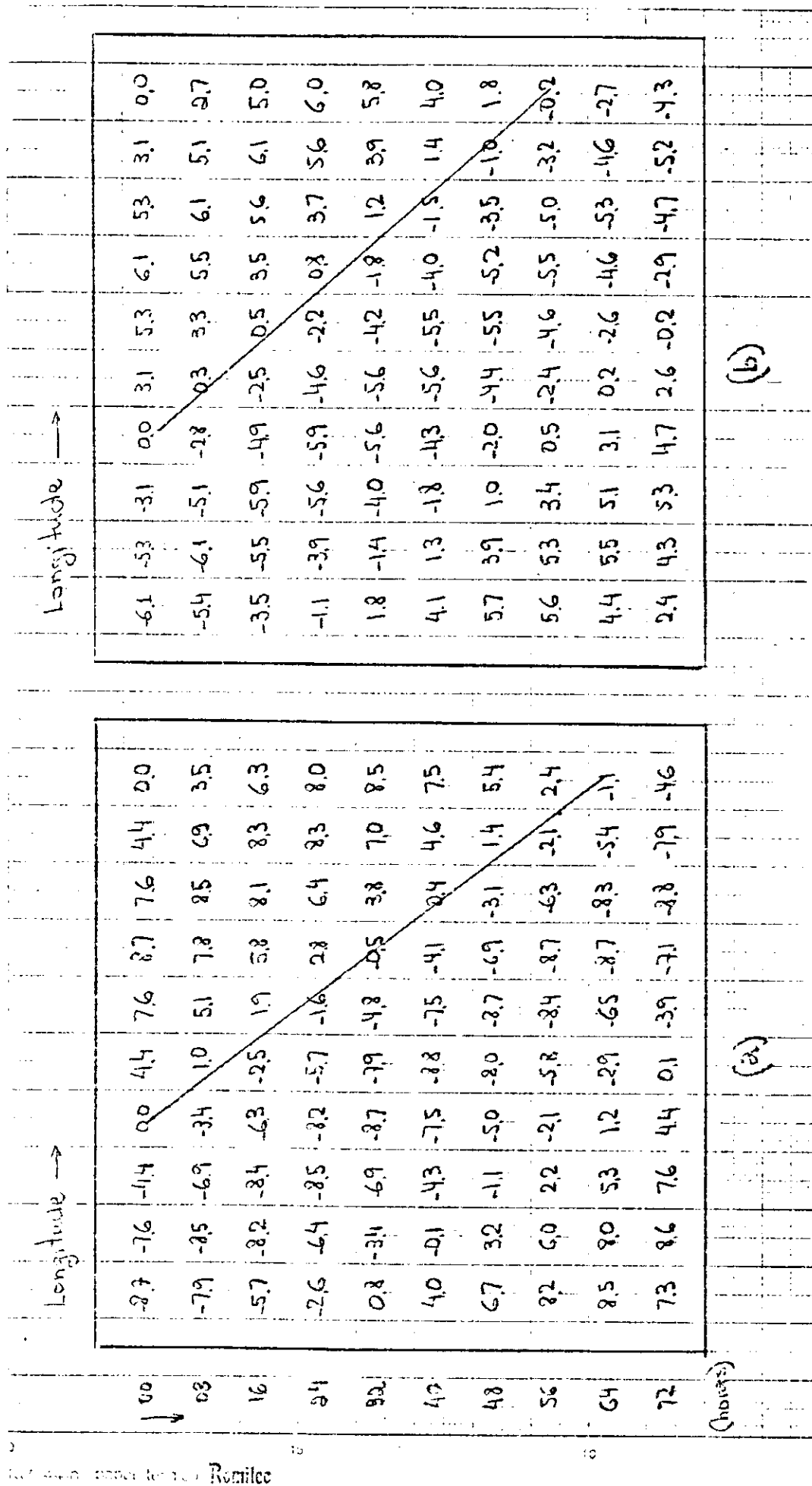


Fig. 5 - Secção tempo x longitude para a componente meridional v, de  $P_{12}^{13}$  mostrando uma linha de fase em  
a)  $\phi = 10^\circ$  e b)  $\phi = 30^\circ$  para as condições de contorno S.  $\Delta\lambda = 25^\circ$ .

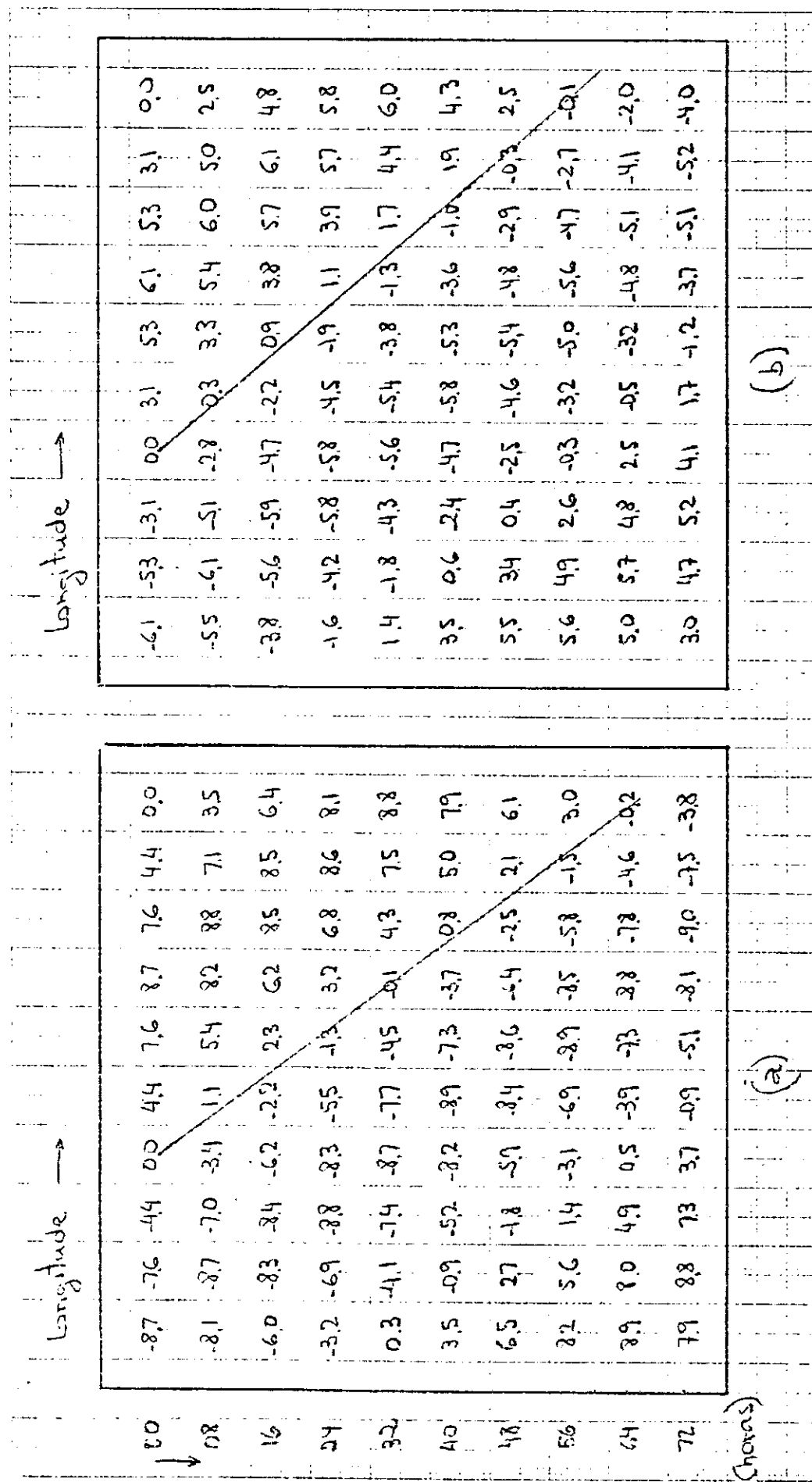


Fig. 6 - Secção tempo x longitude para a componente meridional v, de  $P_{13}^{12}$  mostrando uma linha de fase em a)  $\phi = 10^\circ$  e b)  $\phi = 30^\circ$  para as condições de contorno T.  $\Delta\lambda = 25^\circ$ .

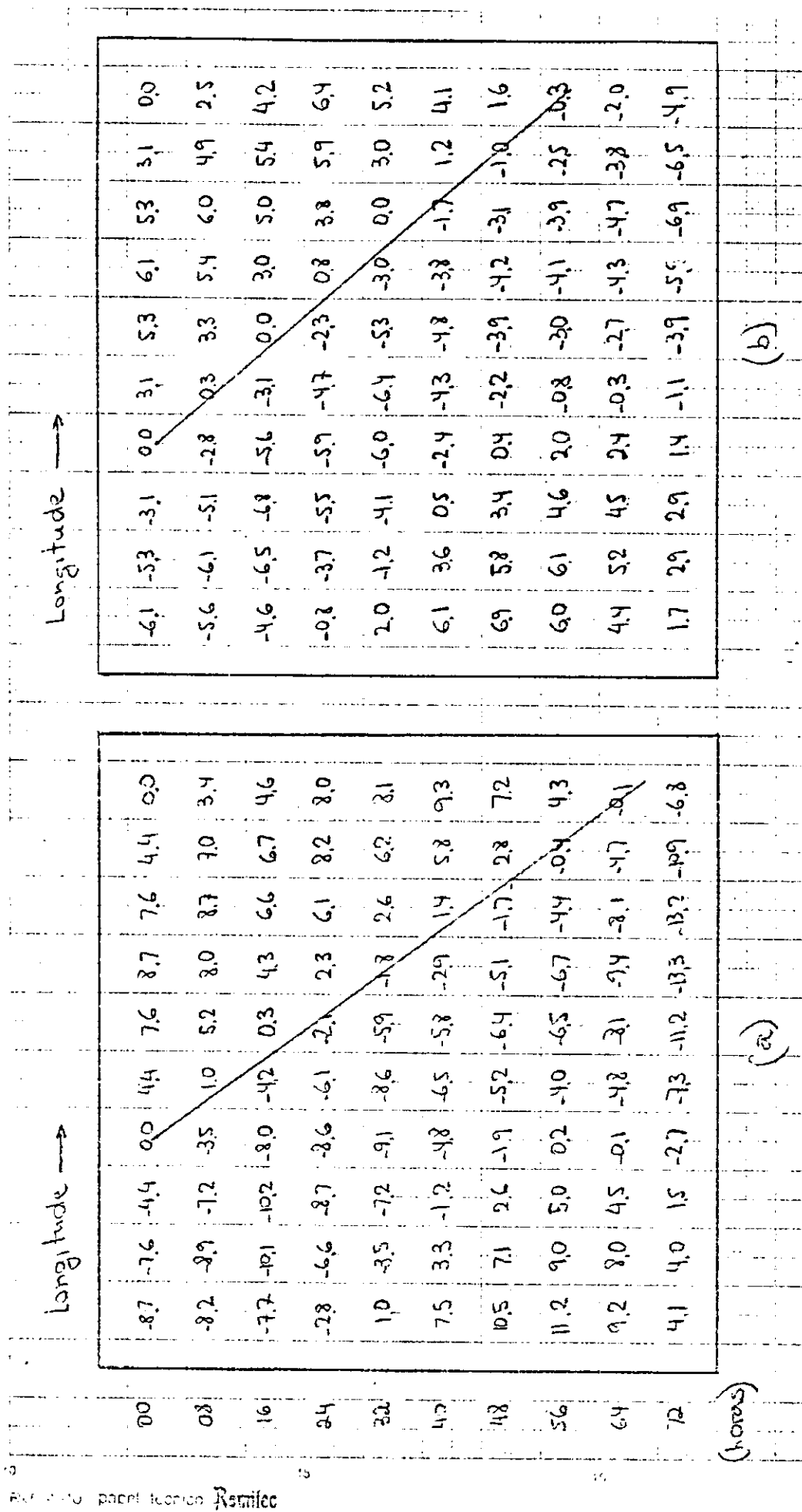




TABELA 2

VELOCIDADES DE FASE ( $\text{Km H}^{-1}$ ) PARA  $P_{13}^{12}$

| TIPOS DE<br>CONDIÇÕES<br>CONTORNO | $\phi=10^0\text{S}$ |            | $\phi=30^0\text{S}$ |            |
|-----------------------------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
|                                   | Vel. fase           | variação % | Vel. fase           | variação % |
| Valor Teórico                     | 26.5                | -          | 23.6                | -          |
| S                                 | 26.3                | -.75       | 26.5                | 12.3       |
| T                                 | 26.1                | -1.6       | 25.8                | 9.3        |
| E                                 | 20.6                | -22.2      | 32.7                | 38.5       |

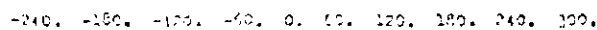


Fig. 8 - A propagação de uma crista da onda  $P^{12}$ , para o caso  $S$  mostrando suas posições em  $t=0, 24, 48$  e  $72$  horas.

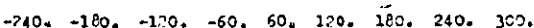


Fig. 9 - A propagação de uma crista da onda  $P_{13}^{12}$ , para o caso F mostrando suas posições em  $t=0$ , 24, 48 e 72 horas.

CAMPO DO DEBILITAMENTO INICIAL AJUSTADO

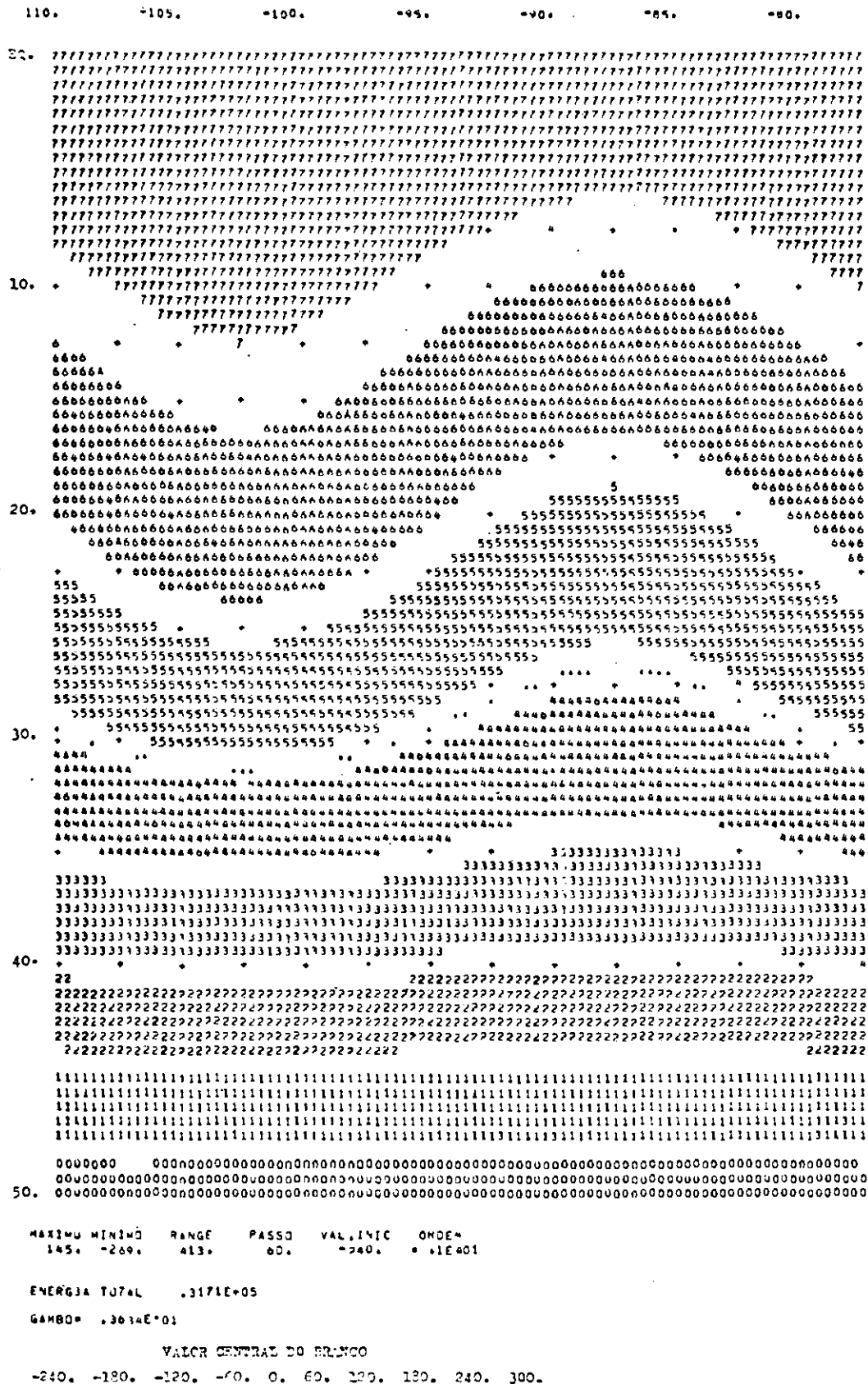


Fig. 10 - A propagação de uma crista da onda  $P_{12}^{12}$ , para o caso E  
mostrando suas posições em  $t=0, 24, 48$  e  $72$  horas.

## 5.2 EXPERIMENTOS COM ONDA $P_{15}^{12}$

A segunda série de experimentos numéricos, com dados teóricos, consistiu em usar uma onda de Neamtan, escolhida de modo a se ter valores moderadamente grandes da componente  $v$ , nas proximidades de uma das fronteiras, a fim de testar o modelo em termos de condições de contorno. A onda escolhida foi a  $P_{15}^{12}$  com os seguintes valores para as constantes:  $A = 4 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ,  $B = 2 \times 10^{-6} \text{ rad s}^{-1}$  e  $C = 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , resultando uma frequência angular  $\nu$  igual a  $1.653 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$ . Para esses valores, a componente  $v$ , com amplitude nula no equador, apresenta um mínimo ( $-8.36 \text{ m s}^{-1}$ ) em torno da latitude  $10^\circ\text{S}$ , para crescer até um máximo de  $11.9 \text{ m s}^{-1}$  (em  $32.5^\circ\text{S}$ ) decrescendo, a partir daí, monotonicamente na direção do polo. A distribuição de  $v$  mostra um zero em aproximadamente,  $18^\circ\text{S}$ . O domínio de integração estendeu-se do equador até  $45^\circ\text{S}$  onde o valor de  $v$  é  $4.82 \text{ m s}^{-1}$ .

A Tabela 3 mostra a variação do número  $G$  durante a integração de 72 horas. Como anteriormente, e nesse caso mais esperado, as condições  $S$  são inicialmente as menos "naturais" pois alterando-se os valores de  $v$  nas fronteiras, introduz-se grandes divergências ( $G_{N.3}$ ) que persistem apenas durante as primeiras horas ( $G < .05$  após hora 4). As condições  $T$  também apresentam esse problema, se bem que menos acentuado (Figura 11) e são portanto mais efetivas em não introduzir divergência artificial. Para as condições  $E$ , o número  $G$  cresce monotonicamente, a partir da hora 8, exibindo ainda, na hora 72, a tendência de assim o continuar ( $G_{N.4}$ ). Sem dúvida alguma, o procedimento de interpolar tendências, como condições de contorno, não é recomendado para problemas de PNT em áreas limitadas, como pode ser visto examinando a curvas de amplitude e energia total média versus tempo (Figura 11 e 12). Por essas razões, as condições  $E$  não mais serão consideradas.

As amplitudes nos casos  $S$  e  $T$  (Figura 11) mostram um choque inicial crescendo 4% e 2.6%, após 8 horas, a partir de seus valores em  $t=0$ , de 368 e 377 gpm, respectivamente. Não obstante, o caso  $S$  é superior ao outro, visto que a amplitude tende rapidamente a um valor assintótico de 374 gpm (1.6% do valor inicial), enquanto que, para o

TABELA 3

NÚMERO G (x10), EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA P<sup>12</sup><sub>15</sub>

| HORA | TIPOS DE CON. CONTORNO |      |       |
|------|------------------------|------|-------|
|      | S                      | T    | E     |
| 00   | 2.985                  | .473 | .473  |
| 01   | .614                   | .162 | .144  |
| 02   | 1.137                  | .339 | .333  |
| 03   | .910                   | .184 | .167  |
| 04   | .448                   | .225 | .251  |
| 05   | .469                   | .211 | .229  |
| 06   | .475                   | .170 | .184  |
| 07   | .417                   | .164 | .146  |
| 08   | .600                   | .153 | .170  |
| 12   | .248                   | .111 | .096  |
| 16   | .308                   | .082 | .113  |
| 20   | .329                   | .088 | .231  |
| 24   | .180                   | .095 | .509  |
| 28   | .353                   | .097 | .900  |
| 32   | .151                   | .092 | 1.331 |
| 36   | .322                   | .091 | 1.836 |
| 40   | .159                   | .091 | 2.341 |
| 44   | .273                   | .090 | 2.721 |
| 48   | .171                   | .089 | 2.888 |
| 52   | .227                   | .087 | 2.954 |
| 56   | .230                   | .084 | 3.044 |
| 60   | .164                   | .082 | 3.174 |
| 64   | .233                   | .081 | 3.315 |
| 68   | .162                   | .078 | 3.604 |
| 72   | .250                   | .075 | 4.158 |

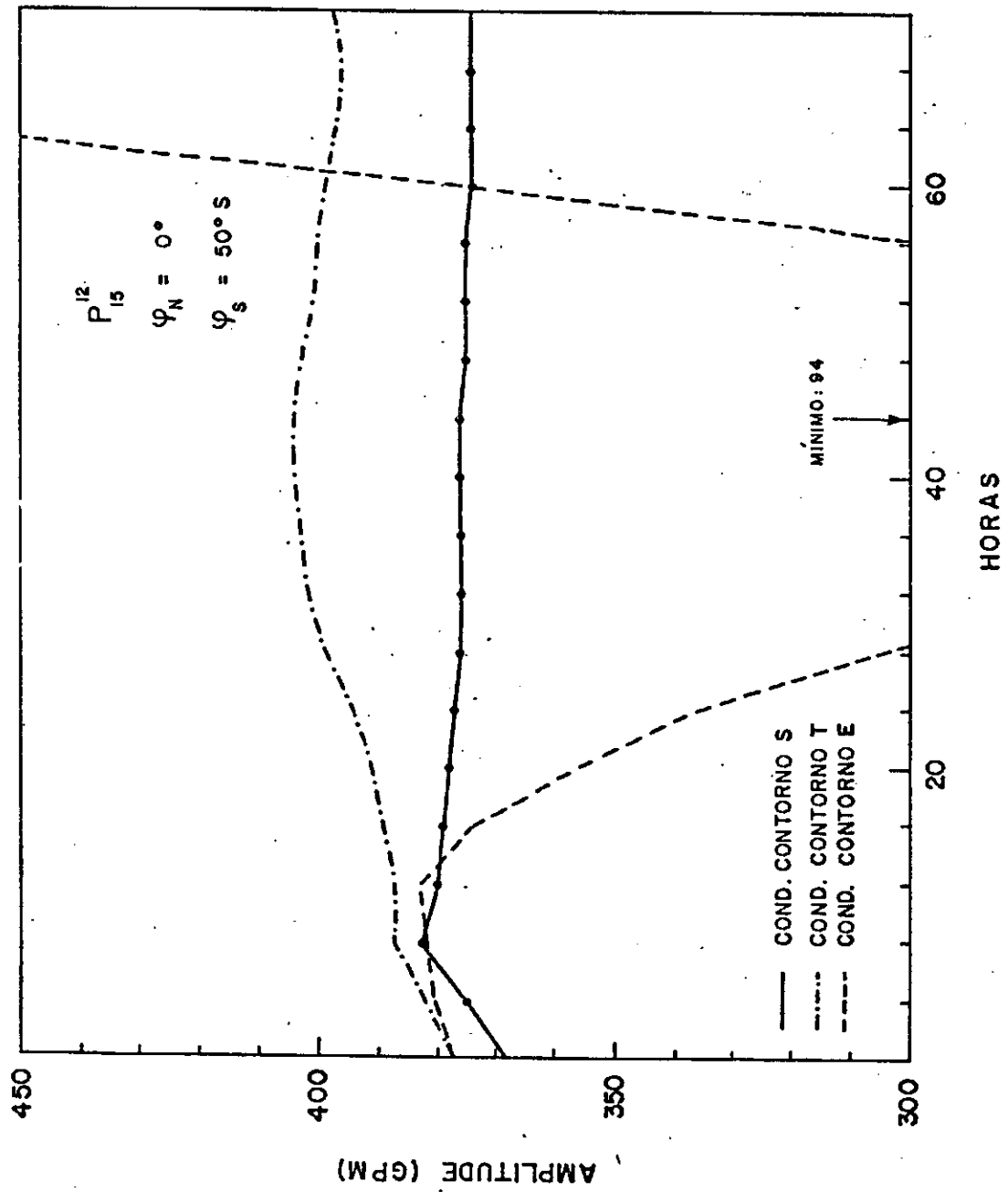


Fig. 11 - Amplitude do campo de altura geopotencial, para a integração da onda  $p_{15}^{12}$ , com os três tipos de condições de contorno.

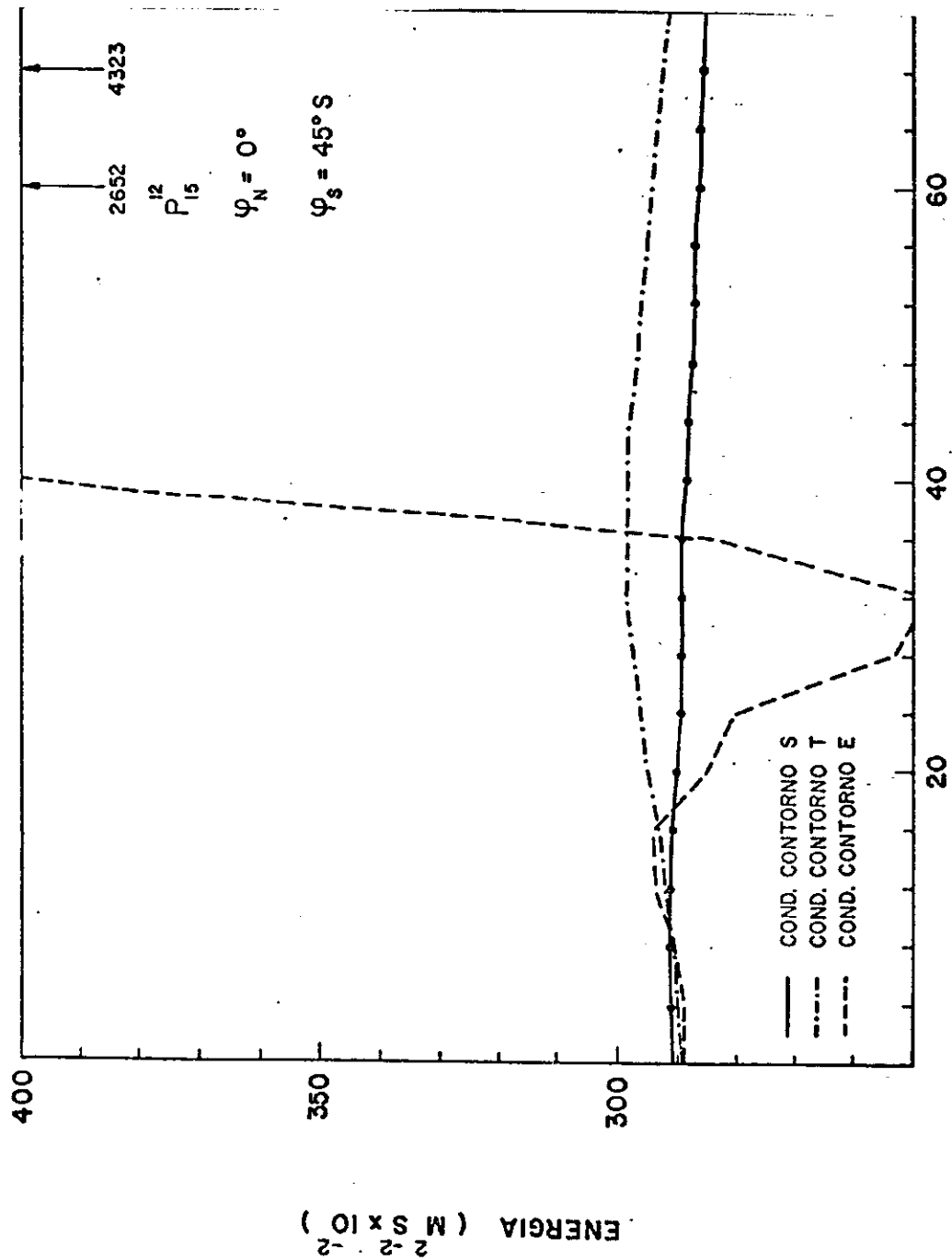


Fig. 12 - Curvas de energia total para a onda  $P_{12}$ , para os três tipos de  $P_{15}$  condições de contorno testados.



caso T, a amplitude continua a crescer até a hora 40, apresentando, a partir de então, uma pequena oscilação em torno de um valor médio de 40 gpm (7.4% do valor inicial). O caso S é também superior, do ponto de vista de conservação de energia (Figura 12).

As Figuras 13, 14 e 15 mostram secções tempo x longitude para a componente v, com linhas nodais para  $\phi=10^0$  e  $30^0S$ , separadamente, para os três tipos de condições de contorno. A partir delas, as velocidades de fase no modelo foram calculadas e as comparações com as velocidades teóricas são dadas na Tabela 4. Os erros percentuais são, correspondentes, maiores que aqueles observados para a onda  $P_{12}^{13}$ .

O processo de relaxação da equação de balanço, para as condições S, convergiu em todos os pontos de grade em 115 iterações; para os casos T e E, o número máximo de iterações permitido (220) foi excedido deixando dois pontos sem convergir. Figuras 16 e 17 mostram a propagação de uma crista de 24 em 24 horas; o caso E não é mostrado devido à caoticidade da velocidade de fase.

## 6 CONCLUSÕES

Um modelo numérico, não-linear, barotrópico, de equações primitivas, foi desenvolvido e testado com dados hipotéticos do tipo "Ondas de Neamtan" (soluções da equação da vorticidade barotrópica, não-divergente em uma geometria esférica). Os experimentos numéricos realizados tiveram por objetivo principal testar um método de inicialização (equação de balanço) próprio para latitudes tropicais, bem como o modelo de previsão propriamente dito, pois não existe uma teoria geral das propriedades de esquemas de diferenças finitas, inclusive análise de estabilidades, aplicável às equações primitivas não-simpli ficadas para área limitada. Por se tratar de um modelo de área limita da, o problema da escolha de condições de contorno adequadas é crítico.

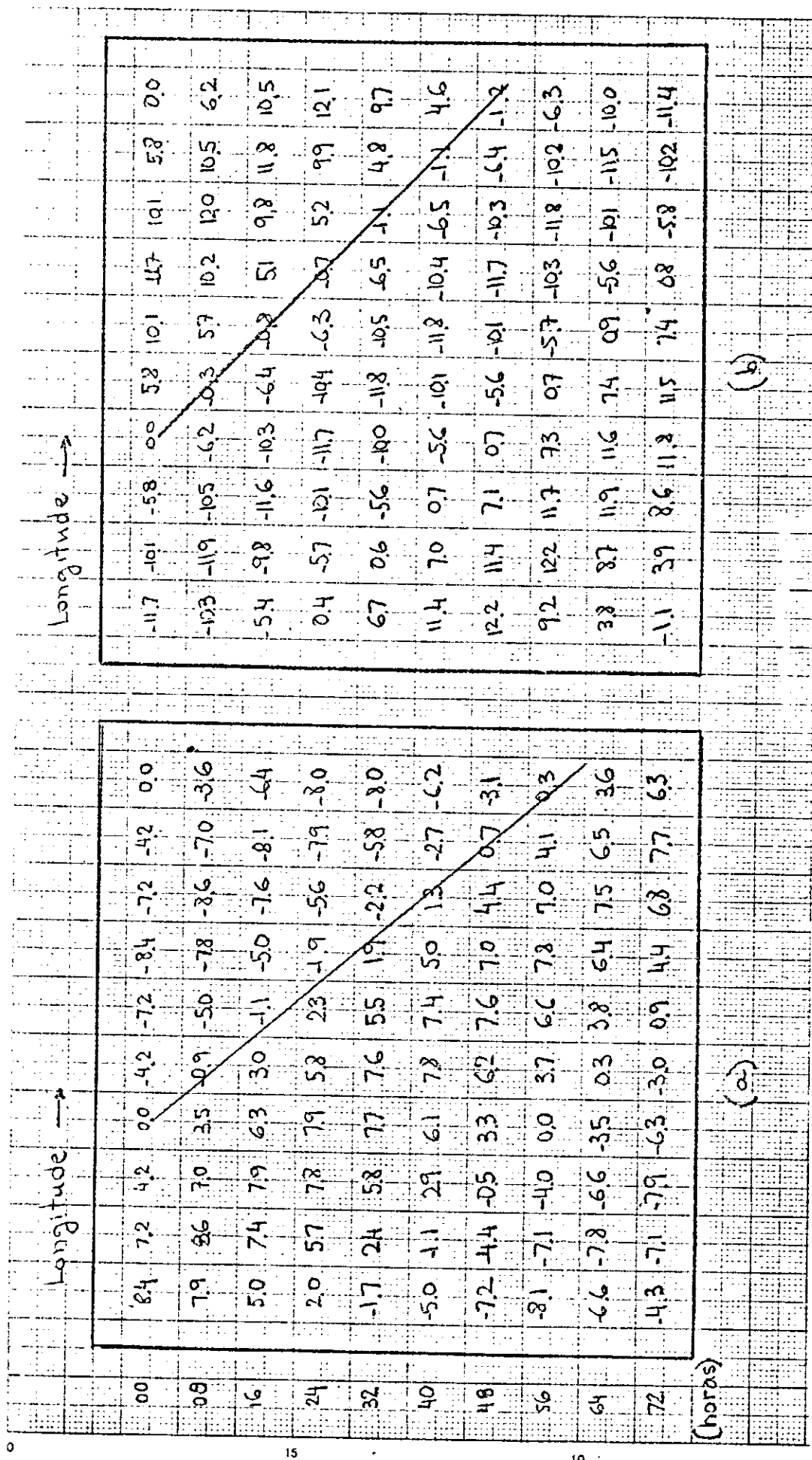


Fig. 13 - Seção tempo x longitude para a componente meridional  $v$ , de  $p^{12}$  mostrando uma linha de fase em a)  $\phi = 10^\circ$  e b)  $\phi = 30^\circ S$  para as condições de contorno S.

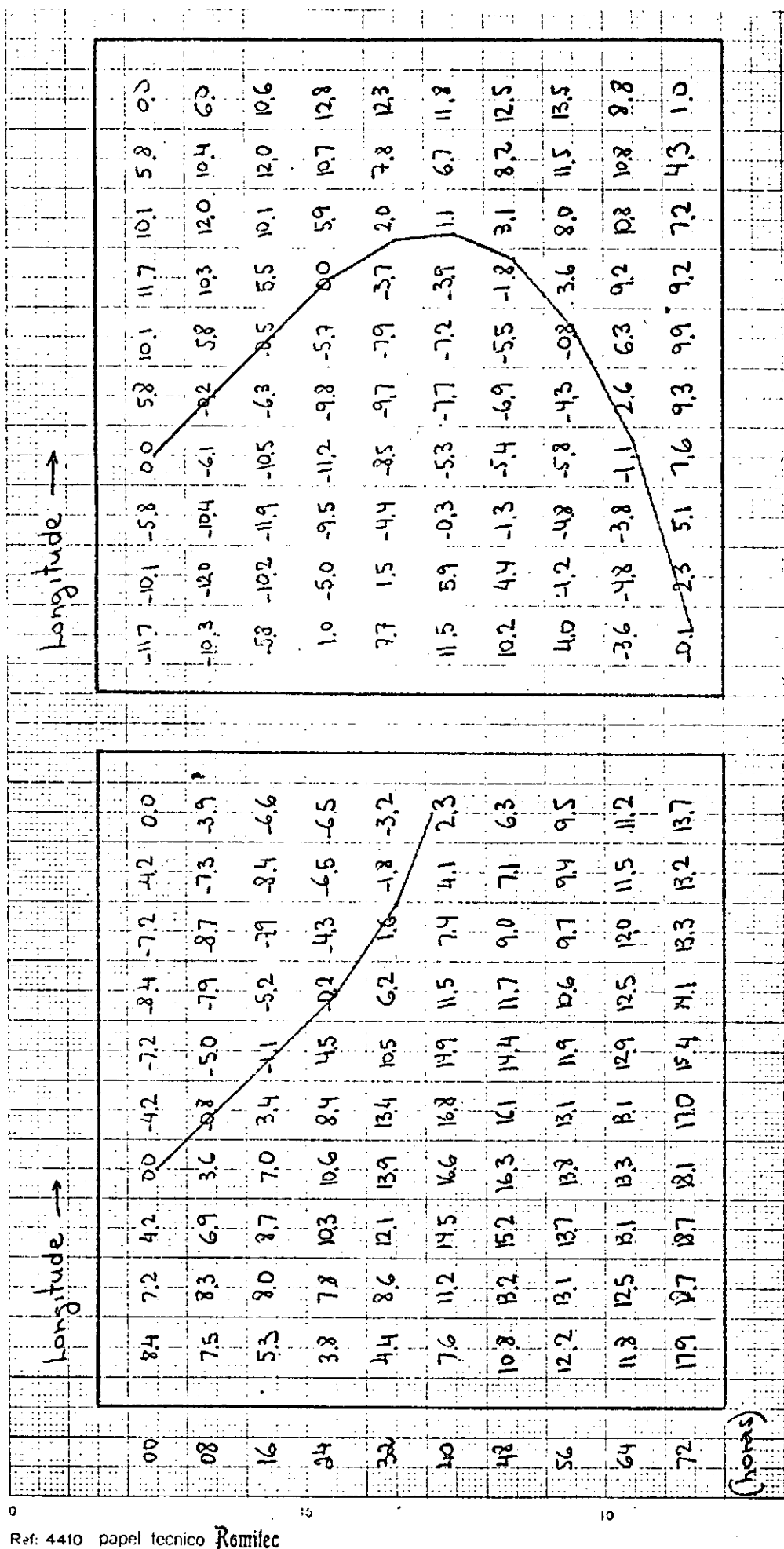


Fig. 14 - Secção tempo x longitude para a componente meridional v, de  $p^{12}$  mostrando uma linha de fase em a)  $\phi=10^0$  e b)  $\phi=30^0S$  para as condições de contorno T.

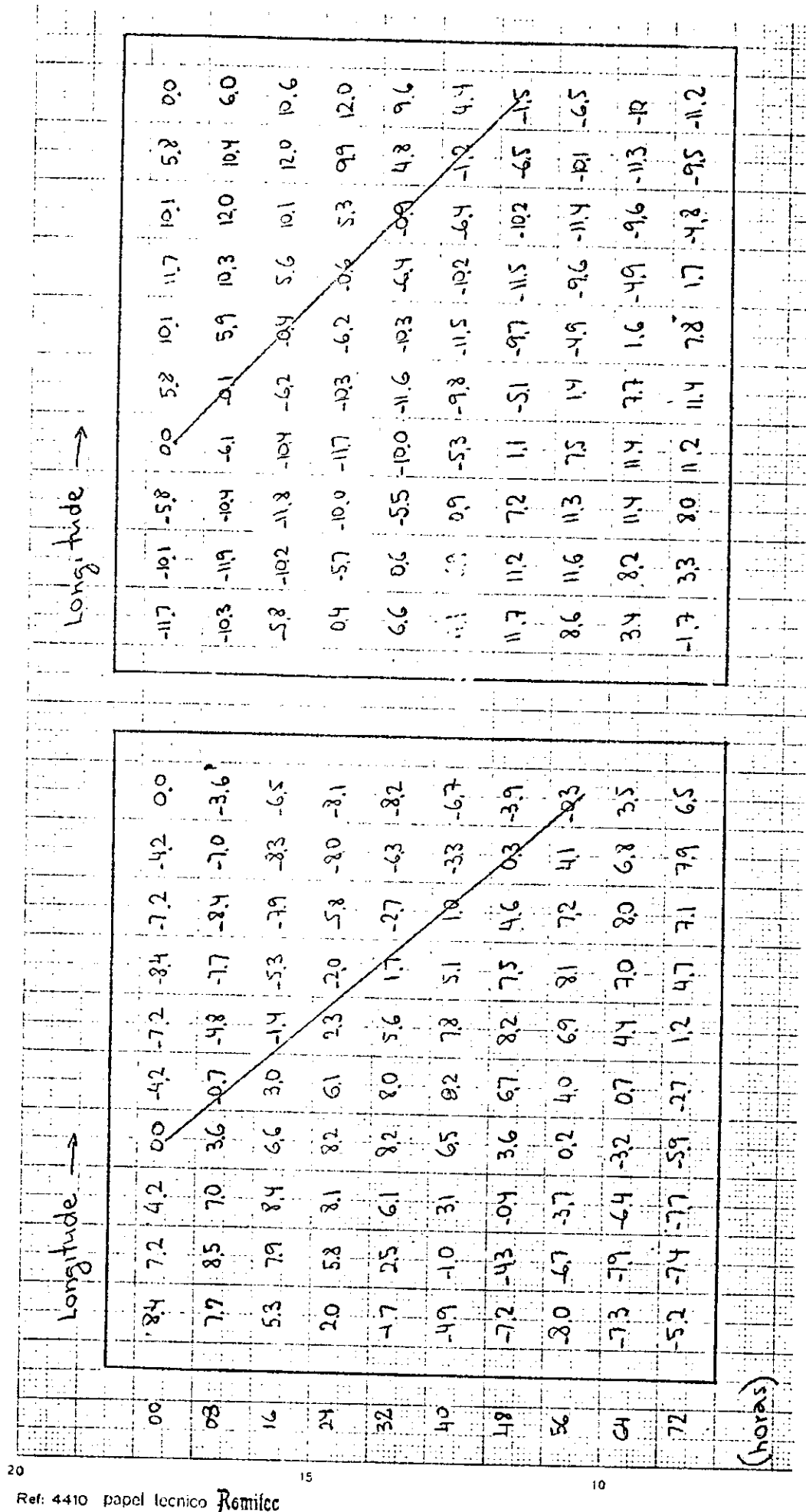
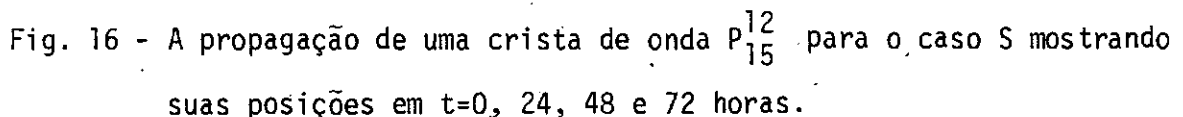


Fig. 15 - Seção tempo x longitude para a componente meridional v, de  $P_{15}^{12}$  mostrando uma linha de fase em a)  $\phi=10^\circ$  e b)  $\phi=30^\circ$ S para as condições de contorno E.

TABELA 4

VELOCIDADES DE FASE ( $\text{Km H}^{-1}$ ) PARA  $P_{15}^{12}$

| TIPOS DE<br>COND. DE<br>CONTORNO | $\phi=10^{\circ}\text{S}$ |            | $\phi=30^{\circ}\text{S}$ |            |
|----------------------------------|---------------------------|------------|---------------------------|------------|
|                                  | Vel. fase                 | variação % | Vel. fase                 | variação % |
| Valor Teórico                    | 30.9                      | -          | 27.6                      | -          |
| S                                | 29.3                      | -5.3       | 32.1                      | 16.5       |
| T                                | 29.3                      | -5.3       | 31.4                      | 14.0       |
| E                                | -                         | -          | -                         | -          |



-240, -190, -140, -90, 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300.

Fig. 17 - A propagação de uma crista de onda  $p^{12}$  para o caso T<sub>15</sub> mostrando suas posições em  $t=0, 24, 48$  e  $72$  horas.

Três tipos de condições de contorno foram testados. Uma importante conclusão foi que a qualidade da previsão dos campos de massa e movimento depende, fortemente, da intensidade do escoamento normal às fronteiras norte e sul, bem como do modo como as tendências das variáveis são calculadas ao longo das mesmas. A imposição, ao longo dessas fronteiras de um vento, cuja componente zonal esteja em equilíbrio geotrôfico com o campo de geopotencial (condições S), foi a mais satisfatória das três condições de contorno testadas, mesmo no caso de valores de  $v$  relativamente grandes. A extrapolação de tendências para os pontos de grade sobre as fronteiras, como condição de contorno (condições E) não é recomendada e, certamente, deve ser evitada quando a componente  $v$  não for pequena. Considerando que modelos de equações primitivas são muito sensíveis às condições de contorno, no caso de dados reais o melhor procedimento é o uso de condições de contorno adequadas (condições S, por exemplo), porém aplicadas em fronteiras distantes da região de interesse.

O esquema de integração no tempo, aqui utilizado (Euler backward), introduzem acelerações fictícias na propagação de linhas de fase e novos esquemas ou combinações de esquemas devem ser explorados (um estudo já está em andamento).

O modelo aqui apresentado deverá ser tratado com casos reais, para situações sinopticamente de interesse e alguns casos preliminares (a serem publicados em um futuro próximo) produziram resultados bastante promissores, indicando a viabilidade do uso de modelos de PNT em base operacional, por centros meteorológicos que tenham acesso a computadores eletrônicos.

## 7 AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos aos Drs. Antonio Divino Moura e Vernon Edgar Kousky pelo interesse mostrado e pelas valiosas críticas e sugestões. Agradecem também ao Sr. C. M. Dixit por ter sugerido o teste do modelo com ondas Neantam e ao Sr. Sérgio Henrique Franchito por sua assistência.



BIBLIOGRAFIA

- HALTINER, G. J. *Numerical Weather Prediction*. New York, John Wiley & Sons, 1971.
- HAWKINS, H.F.; ROSENTHAL, S.L. On the Computation of Stream Functions from the wind Field. *Mon. Wea. Rev.* 93, 245-252, 1965.
- KURIHARA, Y. On the Use of Implicit and Iterative Methods for the Time Integration of the Wave Equations. *Mon. Wea. Review* 1, 33-46, 1965.
- NEAMTAN, S.M. The motion of harmonic waves in the atmosphere. *Journal of Met.* 3, 53-56, 1946.
- RIEHL, H. *Tropical Meteorology*. New York, Mc Graw Hill, 1954.
- SHUMAN, F.G. Numerical Experiments with the Primitive Equations, *J. Meteor. Soc. Japan* 40, 85-107, 1962.
- SHUMAN, F.G.; VANDERMAN, L.W. Difference System and Boundary Conditions for the Primitive Equation Barotropic Forecast. *Mon. Wea. Rev.* 94, 329-335, 1966.
- SING, S.S.; SAHA, K. Numerical Experiments with a Primitive Equation Barotropic Model for the Prediction of Movement of Monsoon Depression and Tropical Cyclone. *J. of Appl. Meteor.* 8, 805-810, 1976.
- VANDERMAN, L.W. Global Forecasts on a Latitude-Longitude Grid with Primitive Equations Models In: *International Seminar of Tropical Meteorology*. Campinas (S.P.) Brazil Sept. 25-Out. 10, 1969.

## APÊNDICE A

### FIGURAS SUPLEMENTARES

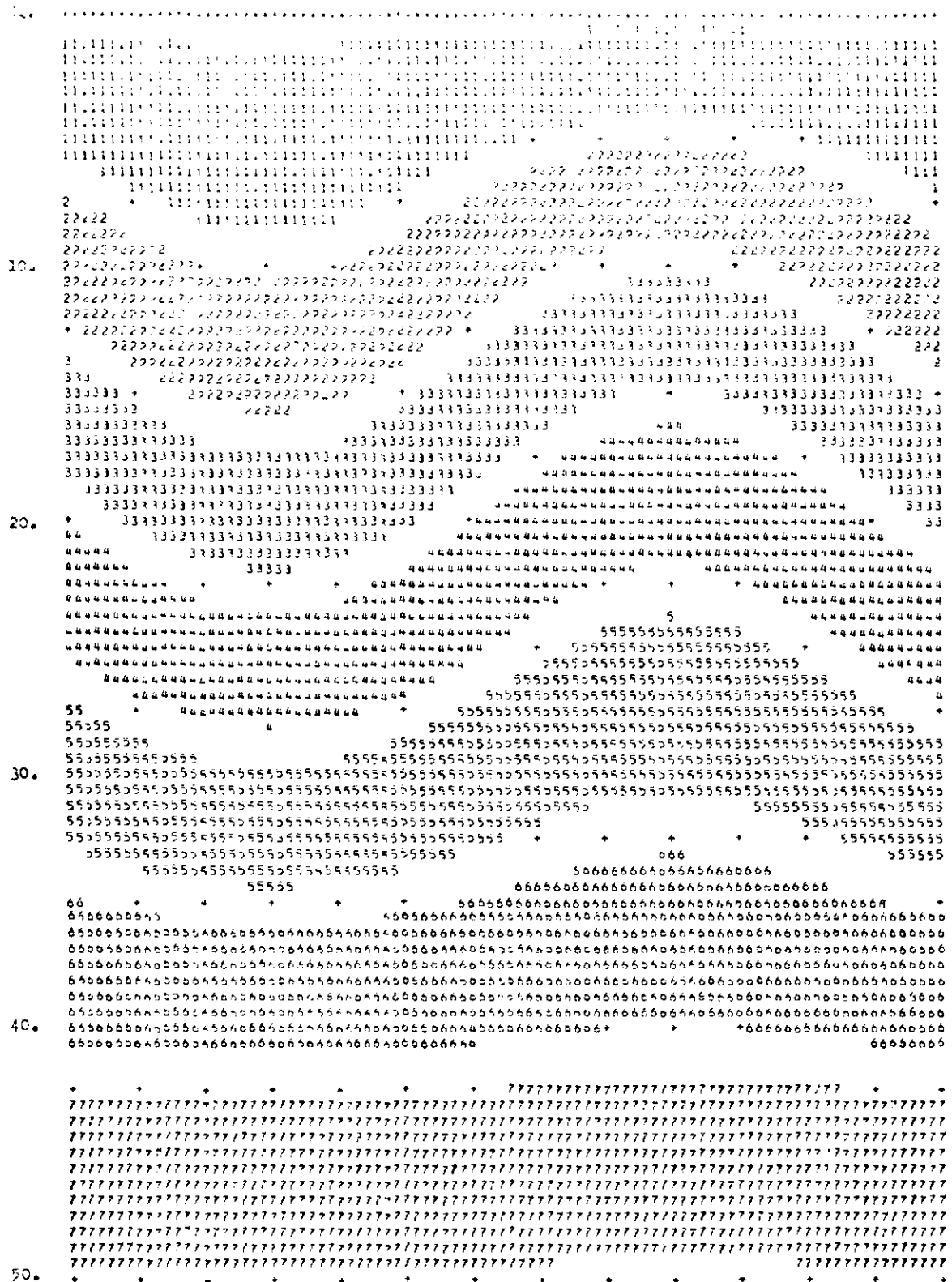
Devido à grande quantidade, as figuras que ilustram a propagação das ondas de Neamtan através do campo de geopotencial impresso pela su-rotina ZEBRA, foram colocadas sequencialmente neste apêndice. Seguem-se as Figuras e as Legendas:

- A.1 Função de Corrente Corresponde a Onda  $P_{13}^{12}$ .
- A.2 O Termo de Poisson na Equação de Balanço para a Onda  $P_{13}^{12}$ .
- A.3 Campo do Geopotencial Inicial Ajustado.
- A.4 Campo do Geopotencial Após 12 horas.
- A.5 Campo do Geopotencial Após 24 horas.
- A.6 Campo do Geopotencial Após 36 horas.
- A.7 Campo do Geopotencial Após 48 horas.
- A.8 Campo do Geopotencial Após 60 horas.
- A.9 Campo do Geopotencial Após 72 horas.
- A.10 Campo do Geopotencial Ajustado.
- A.11 Campo do Geopotencial Após 12 horas
- A.12 Campo do Geopotencial Após 24 horas.
- A.13 Campo do Geopotencial Após 36 horas.
- A.14 Campo do Geopotencial Após 48 horas.
- A.15 Campo do Geopotencial Após 60 horas.
- A.16 Campo do Geopotencial Após 72 horas.

- A.17 Campo do Geopotencial Inicial Ajustado.
- A.18 Campo do Geopotencial Após 12 horas.
- A.19 Campo do Geopotencial Após 24 horas.
- A.20 Campo do Geopotencial Após 36 horas.
- A.21 Campo do Geopotencial Após 48 horas.
- A.22 Campo do Geopotencial Após 60 horas.
- A.23 Campo do Geopotencial Após 72 horas.
- A.24 Função de Corrente para a Onda  $P_{15}^{12}$ .
- A.25 Termo de Psisson na Equação de Balanço para a Onda  $P_{15}^{12}$ .
- A.26 Campo de Geopotencial Inicial Ajustado.
- A.27 Campo de Geopotencial Após 12 horas.
- A.28 Campo do Geopotencial Após 24 horas.
- A.29' Campo do Geopotencial Após 36 horas.
- A.30 Campo do Geopotencial Após 48 horas
- A.31 Campo do Geopotencial Após 60 horas.
- A.32 Campo do Geopotencial Após 72 horas.
- A.33 Campo do Geopotencial Inicial Ajustado.
- A.34 Campo do Geopotencial Após 12 horas.
- A.35 Campo do Geopotencial Após 24 horas.
- A.36 Campo do Geopotencial Após 36 horas.
- A.37 Campo do Geopotencial Após 48 horas.

- A.38 Campo do Geopotencial Após 60 horas.
- A.39 Campo do Geopotencial Após 72 horas.
- A.40 Campo do Geopotencial Inicial Ajustado.
- A.41 Campo do Geopotencial Após 12 horas.
- A.42 Campo do Geopotencial Após 24 horas.
- A.43 Campo do Geopotencial Após 36 horas.
- A.44 Campo do Geopotencial Após 48 horas.
- A.45 Campo do Geopotencial Após 60 horas.
- A.46 Campo do Geopotencial Após 72 horas.

Fig A.1



| MAXIMO | MINIMO | PAGSE | PASSO | VAL. INIC | DIFER   |
|--------|--------|-------|-------|-----------|---------|
| 625.   | 0.     | 625.  | 10.   | 0.        | • 1E+06 |

ENERGIA TOTAL 0.  
GAMRO= 0.

VALOR CENTRAL DO BRAÇO

0. 50. 150. 270. 360. 450. 540. 630. 720. 810.

CONDIÇÕES S

-120. -90. -60. 0. 30. 60. 90. 120. 150.

-240. -180. -120. -60. 0. 60. 120. 180. 240. 300.

Fig. A.4

[illegible]

ENERGIA TOTAL 432845700

GABRIEL .2025E-21

VALOR CENTRAL DO BRANCO

2220. 2290. 2340. 2400. 2460. 2520. 2580. 2640. 2700. 2760.



Fig. A.5

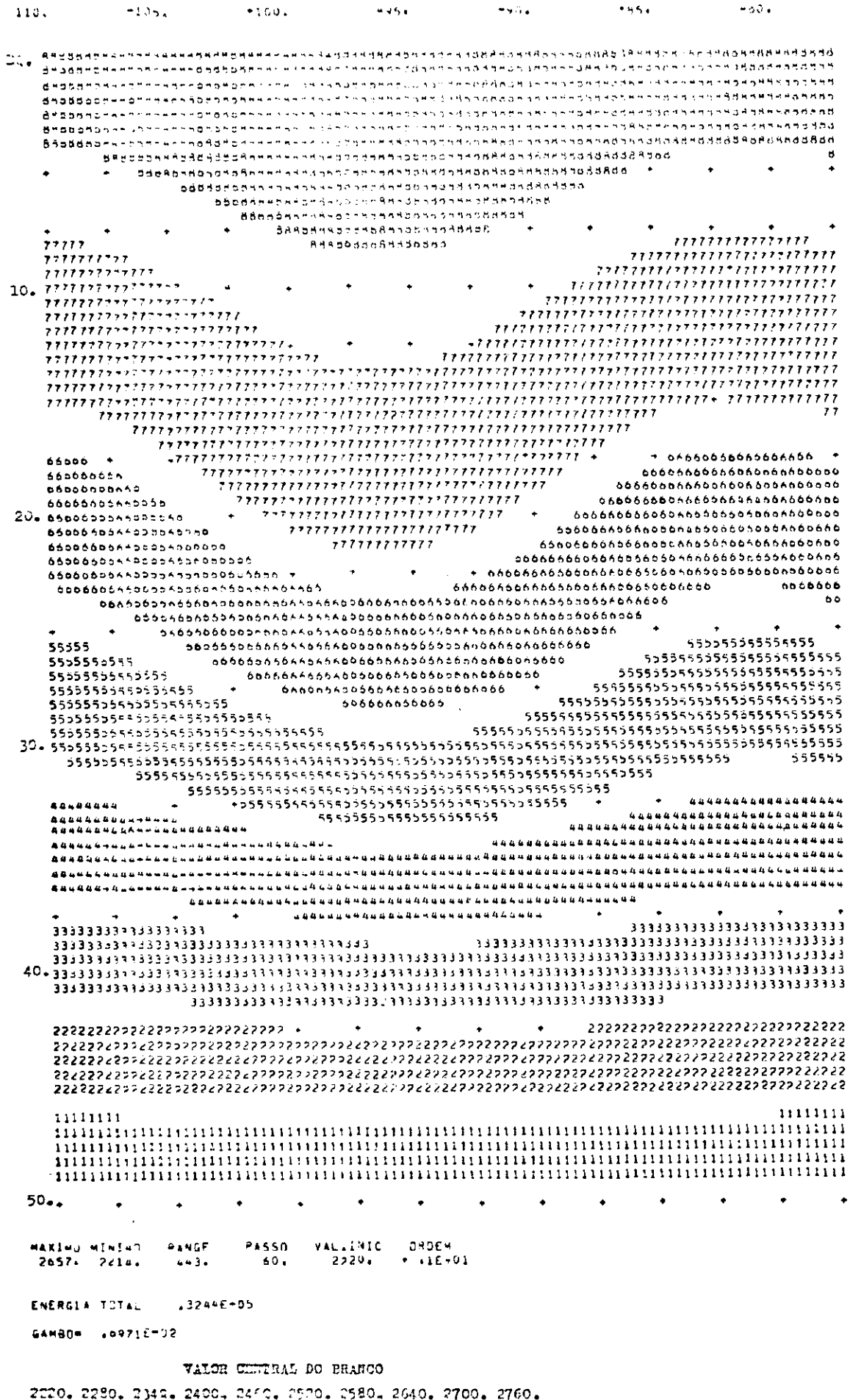
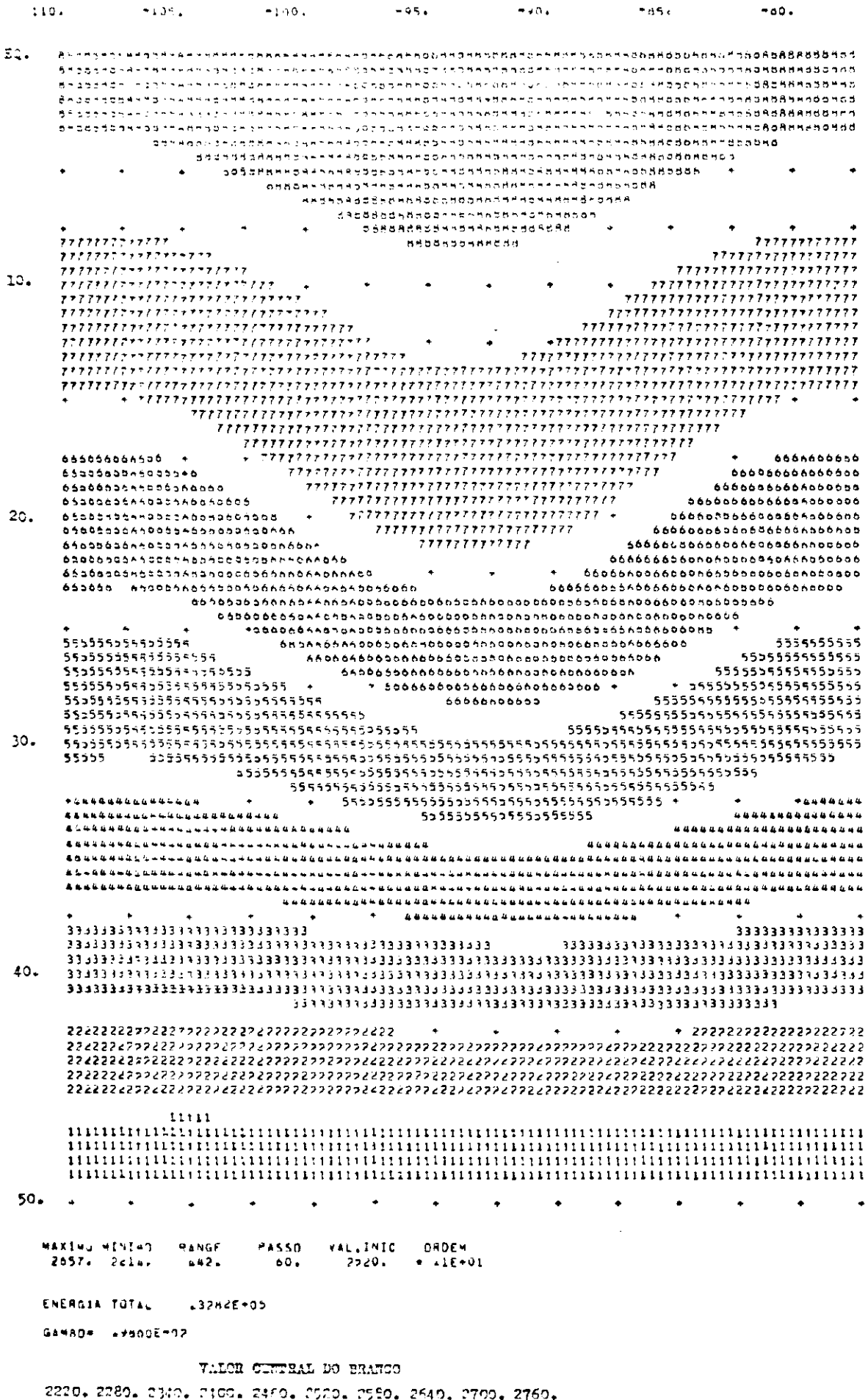


Fig. A.6



50. \*

2220. 2280. 2340. 2400. 2460. 2520. 2580. 2640. 2700. 2760.

Fig. A.8 CAMBIO DE VELOCIDADE A-11 DO MIRA-45

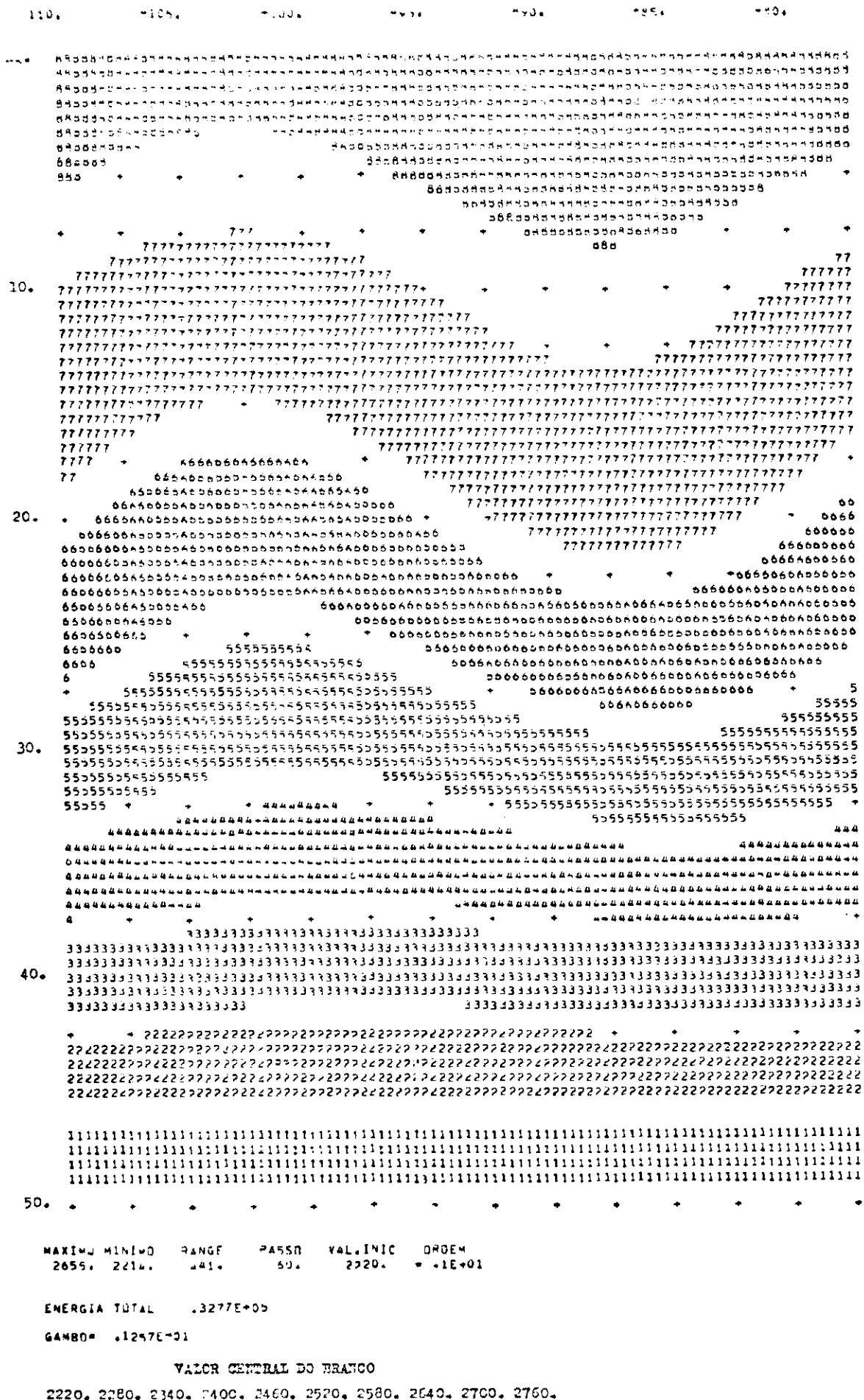
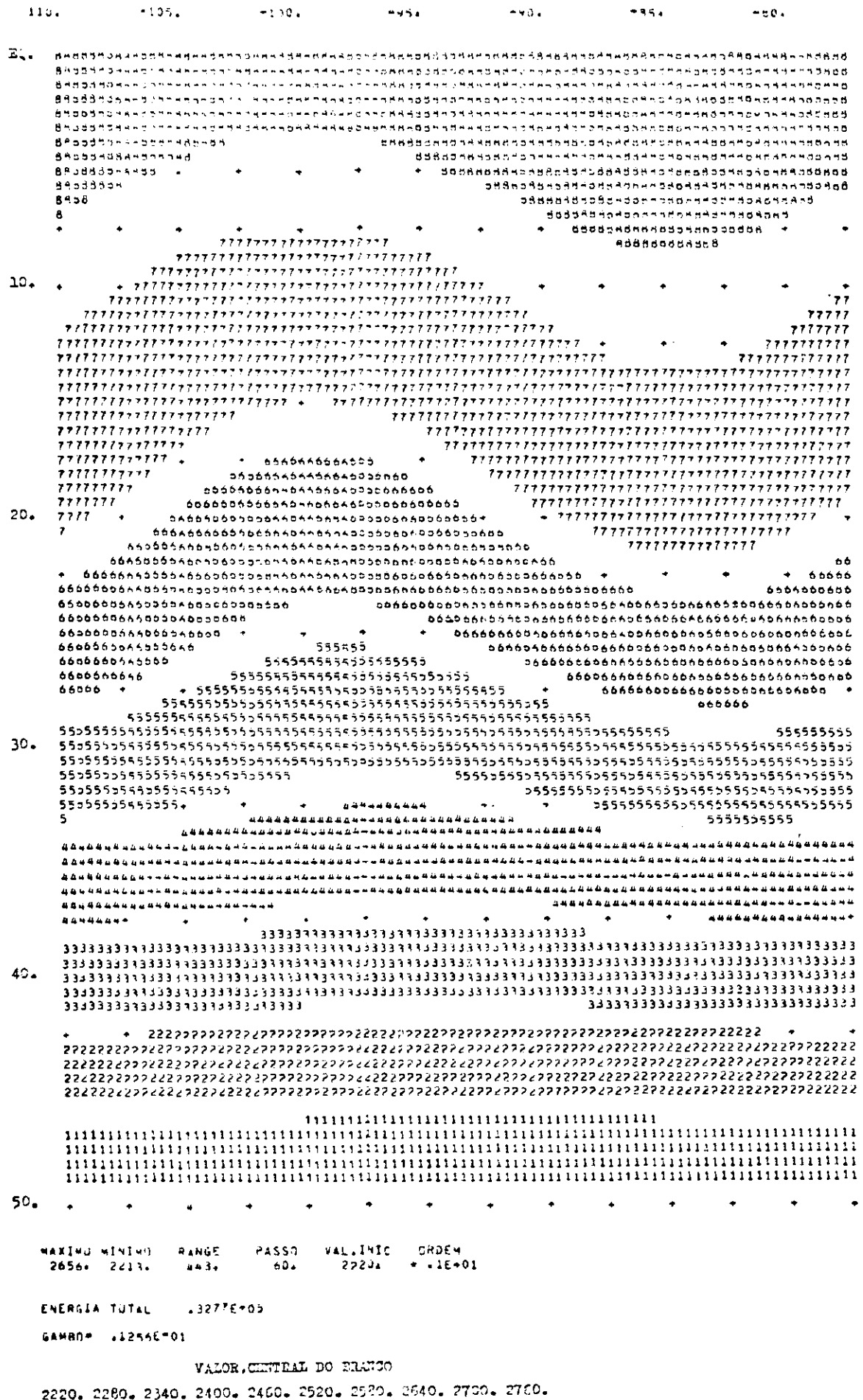


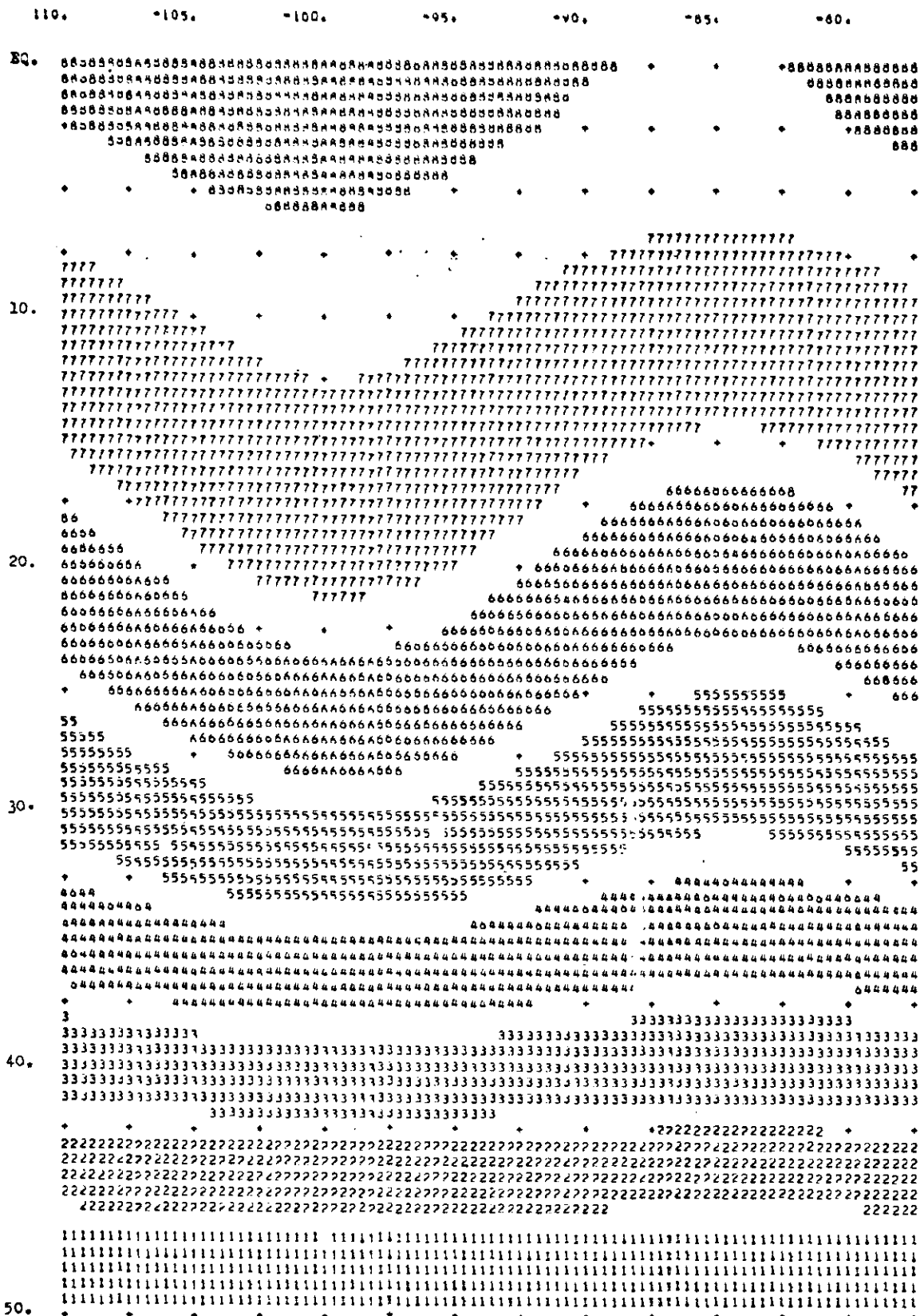
Fig. A.9



-240. -180. -120. -60. 60. 120. 180. 240. 300.

Fig. A.11

CAMPO DO GEOPOTENCIAL APOS 12 HORAS



MAXIMO MINIMO RANGE PASSO VAL.INIC ONDEM  
2852, 2219, 433, 60, 2220, \* 1E+01

ENERGIA TOTAL .317VE+05

GAMMA= .3043E-01

VALOR CENTRAL DO BRANCO

2220, 2280, 2340, 2400, 2460, 2520, 2580, 2640, 2700, 2760.

CAMPO DO GEOPOTENCIAL APÓS 24 HORAS

110.            -105.            -100.            -95.            -90.            -85.            -80.

[illegible]

50. . . . .

| MAXIMUM | MINIMUM | RANGE | ASSO | VAL. INIC | ORDEM    |
|---------|---------|-------|------|-----------|----------|
| 2659.   | 2411.   | u47.  | 60.  | 2220.     | * .1E+01 |

ENERGIA TOTAL .3186E+05

GAMBO= .9993E-02

VALOR CENTRAL DO BRANCO

2220, 2280, 2340, 2400, 2460, 2520, 2580, 2640, 2700, 2760.



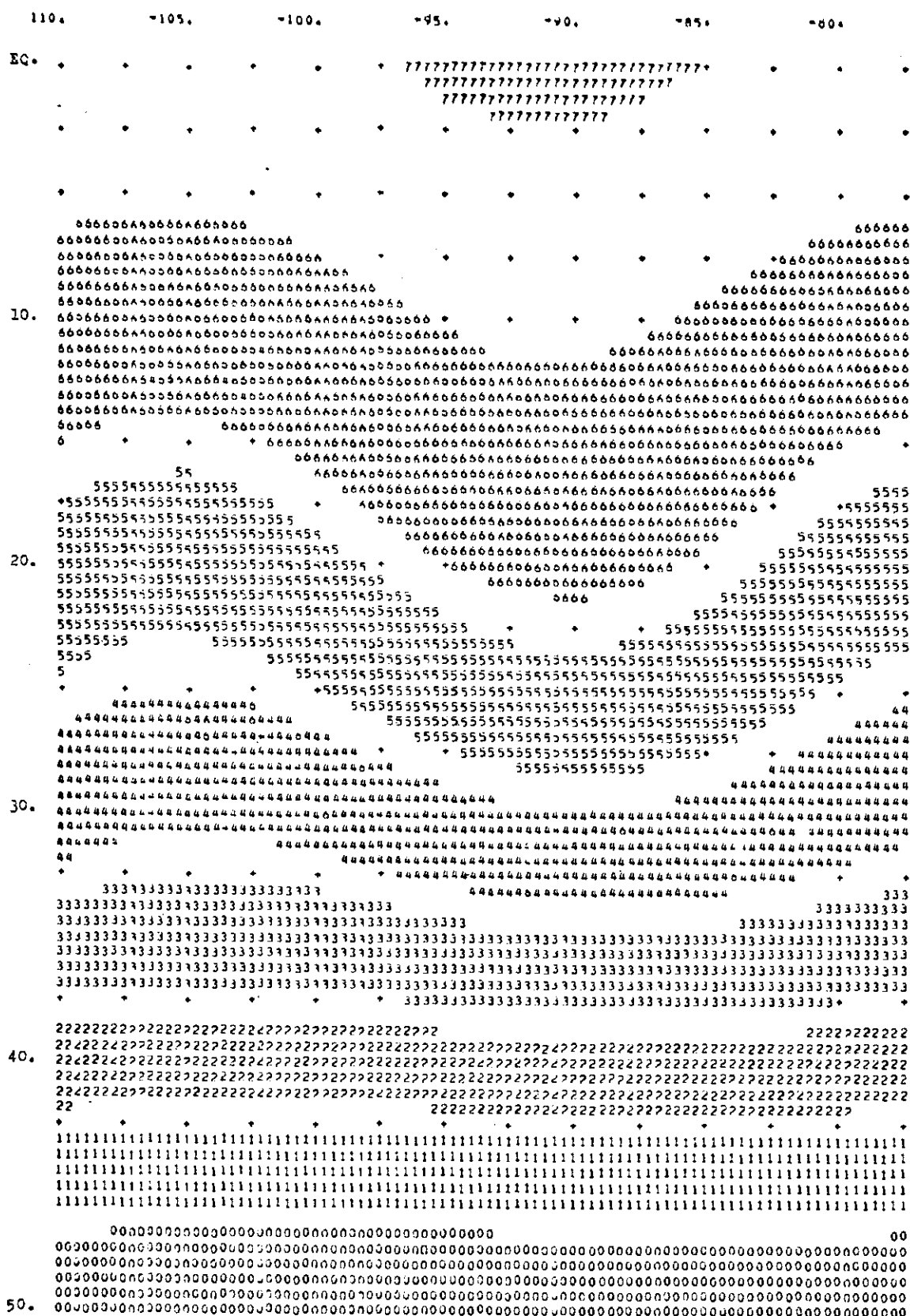
MAXIMO MINIMO RANGE PASSO VAL.INIC ORDEM  
2655. 2217. 438. 60. 2220. \* .1E+01

ENERGIA TOTAL .3179E+05

GAMMA\* .2229E+01

VALOR CENTRAL DO BRANCO

2220. 2280. 2340. 2400. 2460. 2520. 2580. 2640. 2700. 2760.



| MAX[10] | MIN[10] | RANGE | PASSO | VAL.INIC | ORDEN    |
|---------|---------|-------|-------|----------|----------|
| 2648.   | 2227.   | 426.  | 60.   | 2250.    | * ,1E+01 |

ENERGIA TOTAL 4.3172E+05

GAMRON 10412-01

VALOR CENTRAL DO BRANCO

2220. 2280. 2340. 2400. 2460. 2520. 2580. 2640. 2700. 2760.

2220. 2280. 2340. 2400. 2460. 2520. 2580. 2640. 2700. 2760.

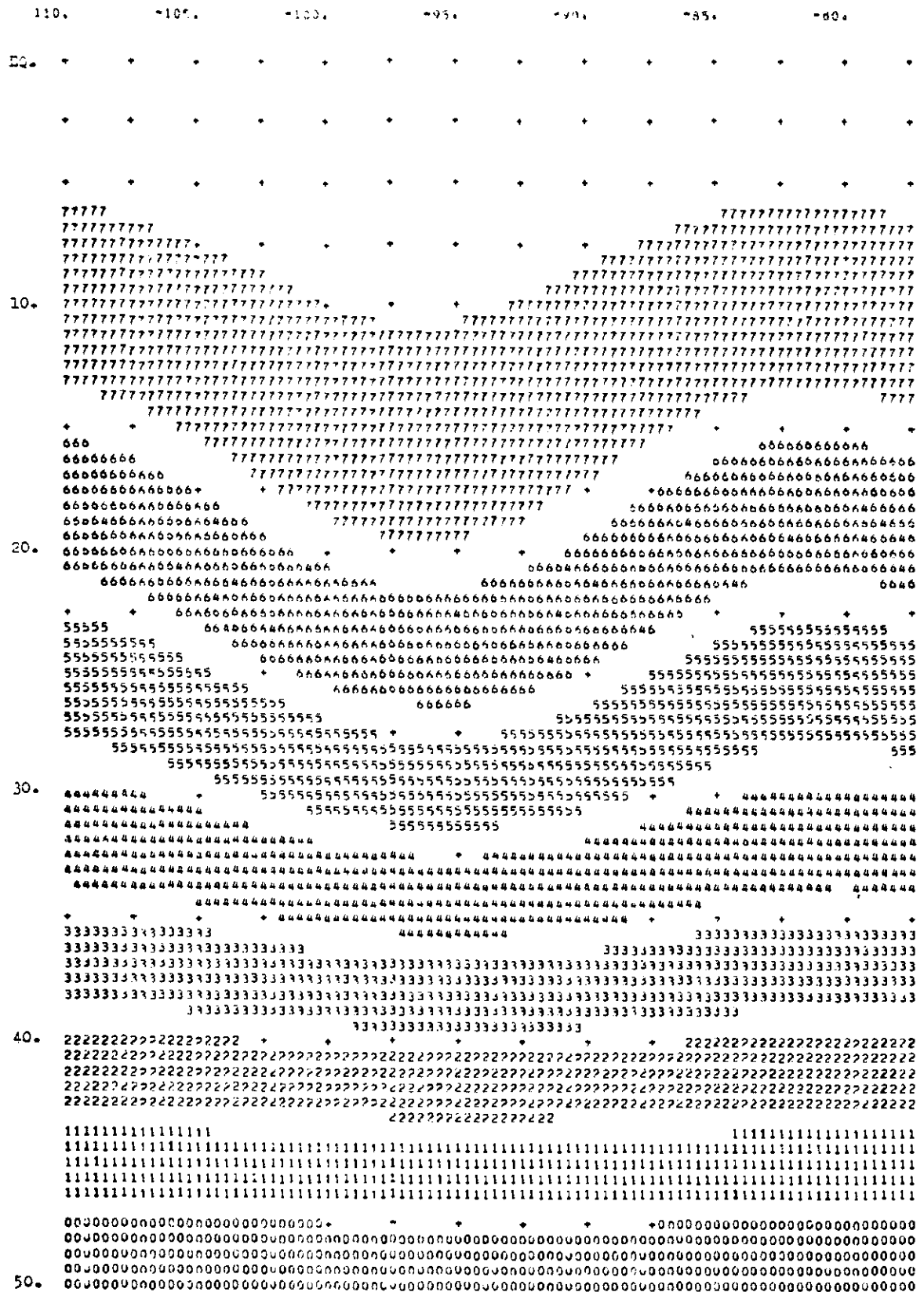
VALOR CENTRAL DO BRANCO

2220. 2280. 2340. 2400. 2460. 2520. 2580. 2640. 2700. 2760.

CONDIÇÕES E

2220, 2230, 2340, 2400, 2460, 2520, 2580, 2640, 2700, 2760.

Fig. A.19 Camera da aerea (1972) della zona di Ruffano



| MAXIMUM | MINIMUM | RANGE | PASSO | VALOR IC | ORDEN    |
|---------|---------|-------|-------|----------|----------|
| 2707.   | 2230.   | 478.  | 60.   | 2260.    | * .1E+01 |

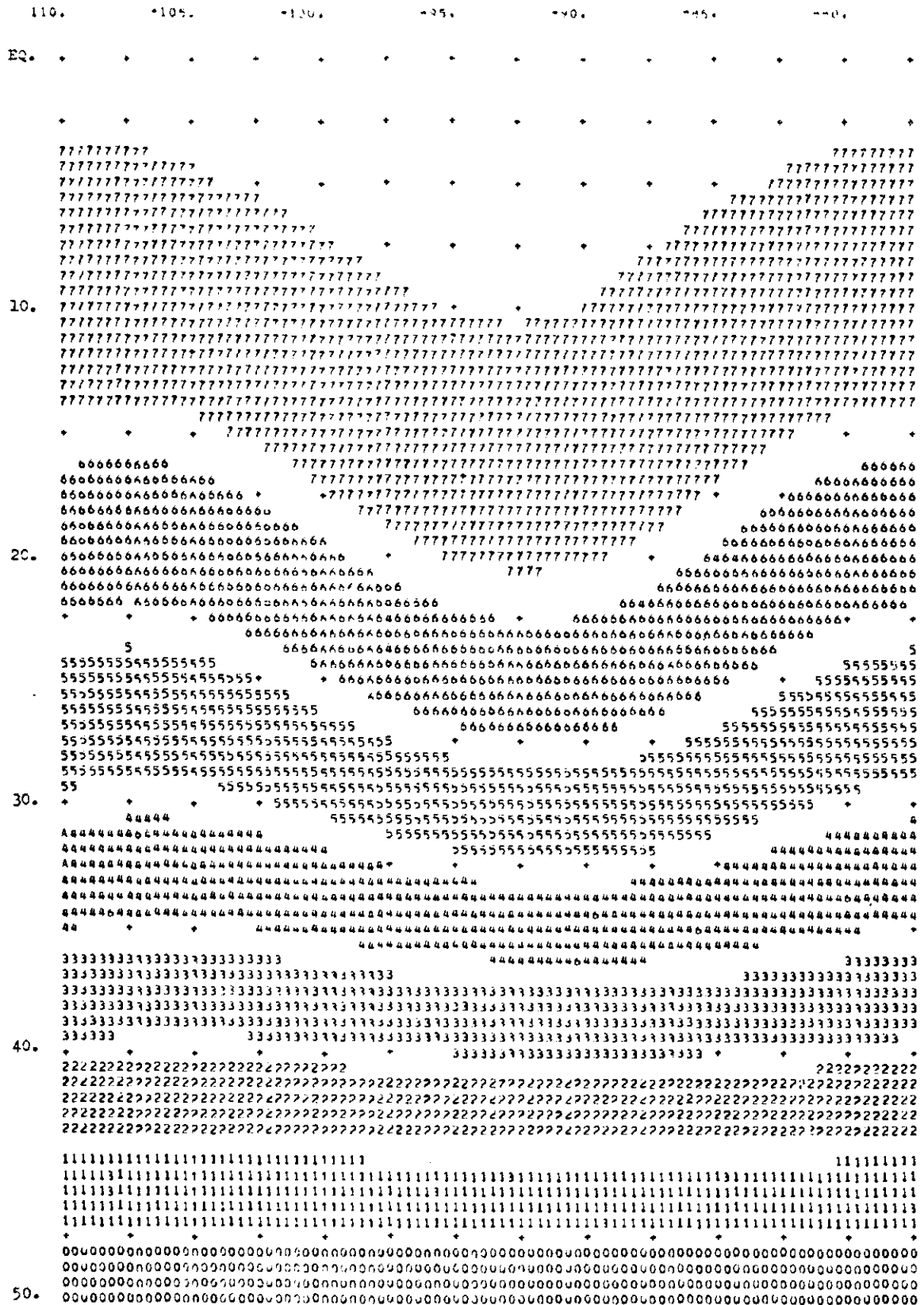
ENERGIA TOTAL .3908E+05

GAMBO .3254E-01

VALOR CENTRAL DO BRANCO

2280. 2340. 2400. 2460. 2520. 2580. 2640. 2700. 2760. 2820

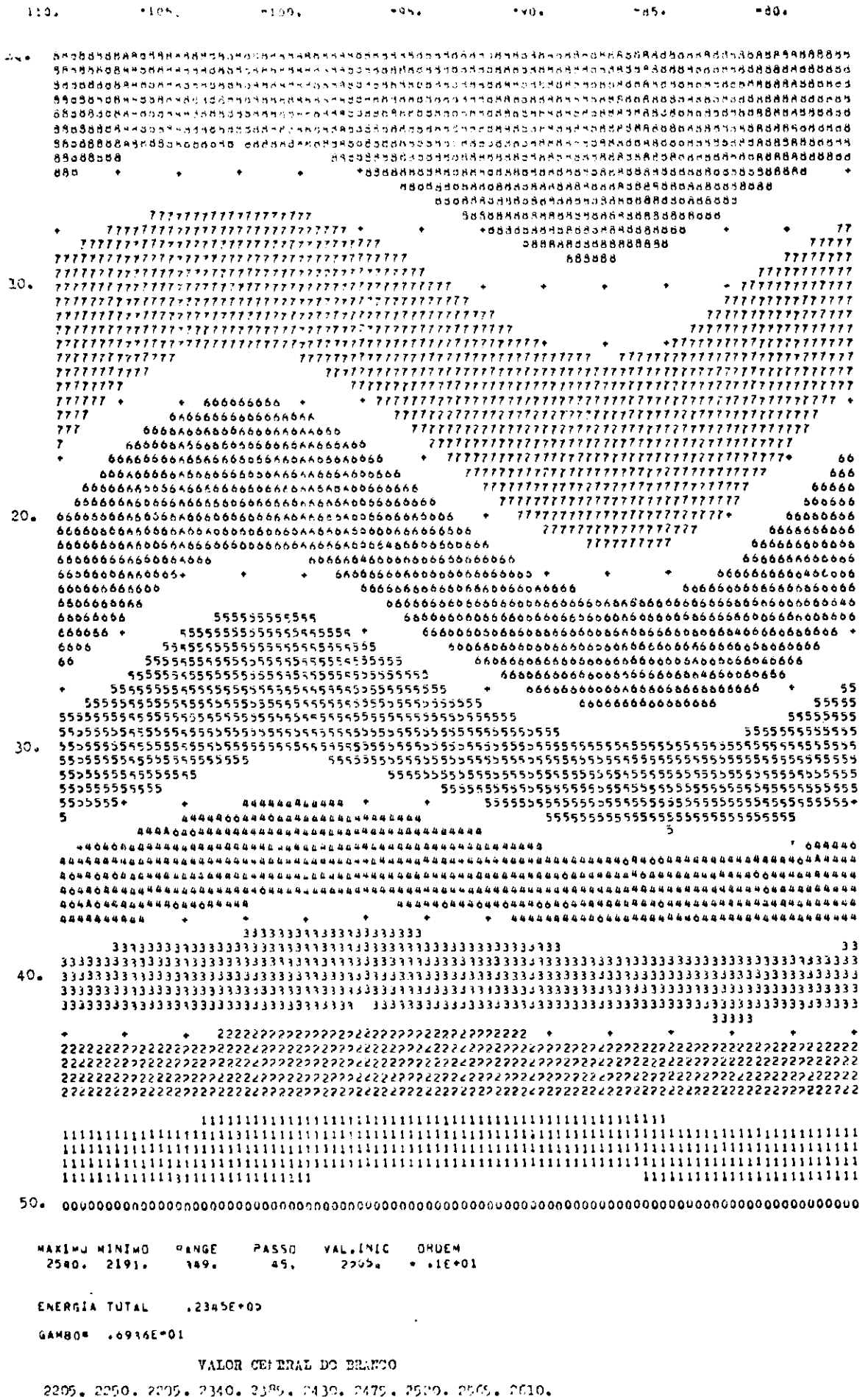
Fig. A.20





VALOR CENTRAL DO BRANCO

Fig. A.22 CAMPO DO APROVECHAMIENTO DE LOS



2220, 2280, 2340, 2400, 2460, 2520, 2580, 2640, 2700, 2760.

0. 90. 180. 270. 360. 450. 540. 630. 720. 810.

-180. -120. -60. 0. 60. 120. 180. 240. 300. 360.

-180. -120. -60. 0. 60. 120. 180. 240. 300. 360.

Fig. A.27 CAMPO DO GEOPOTENCIAL APÓS 12 HORAS

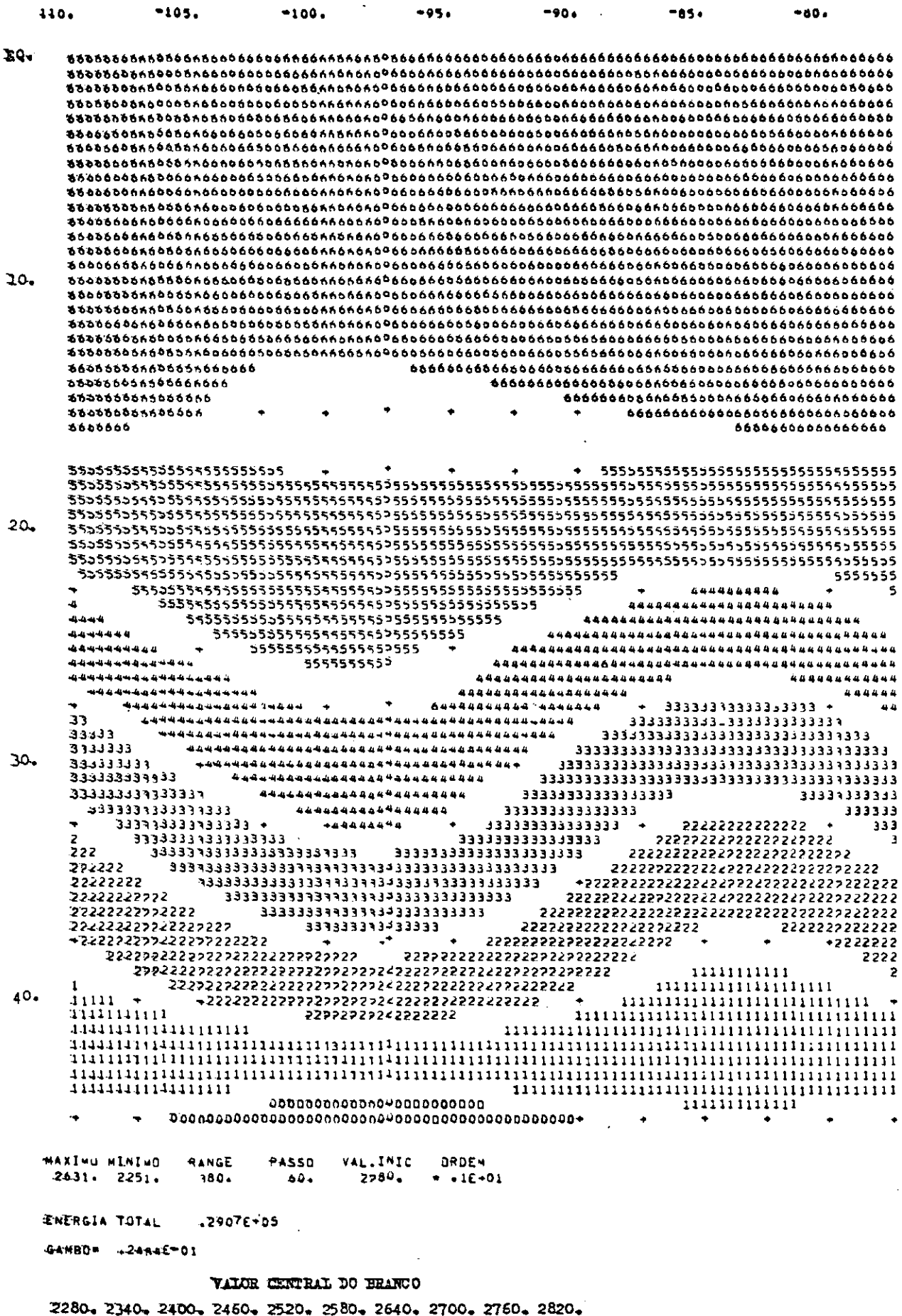


Fig. A.28 CAMPO DO GEOPOTENCIAL APOS 24 HORAS

[illegible]

| MAXIMO | MINIMO | RANGE | PASSO | VAL.INIC | ORDEM    |
|--------|--------|-------|-------|----------|----------|
| 2630.  | 2251.  | 377.  | 60.   | 2280.    | * .1E+01 |

ENERGIA TOTAL .2890E+05

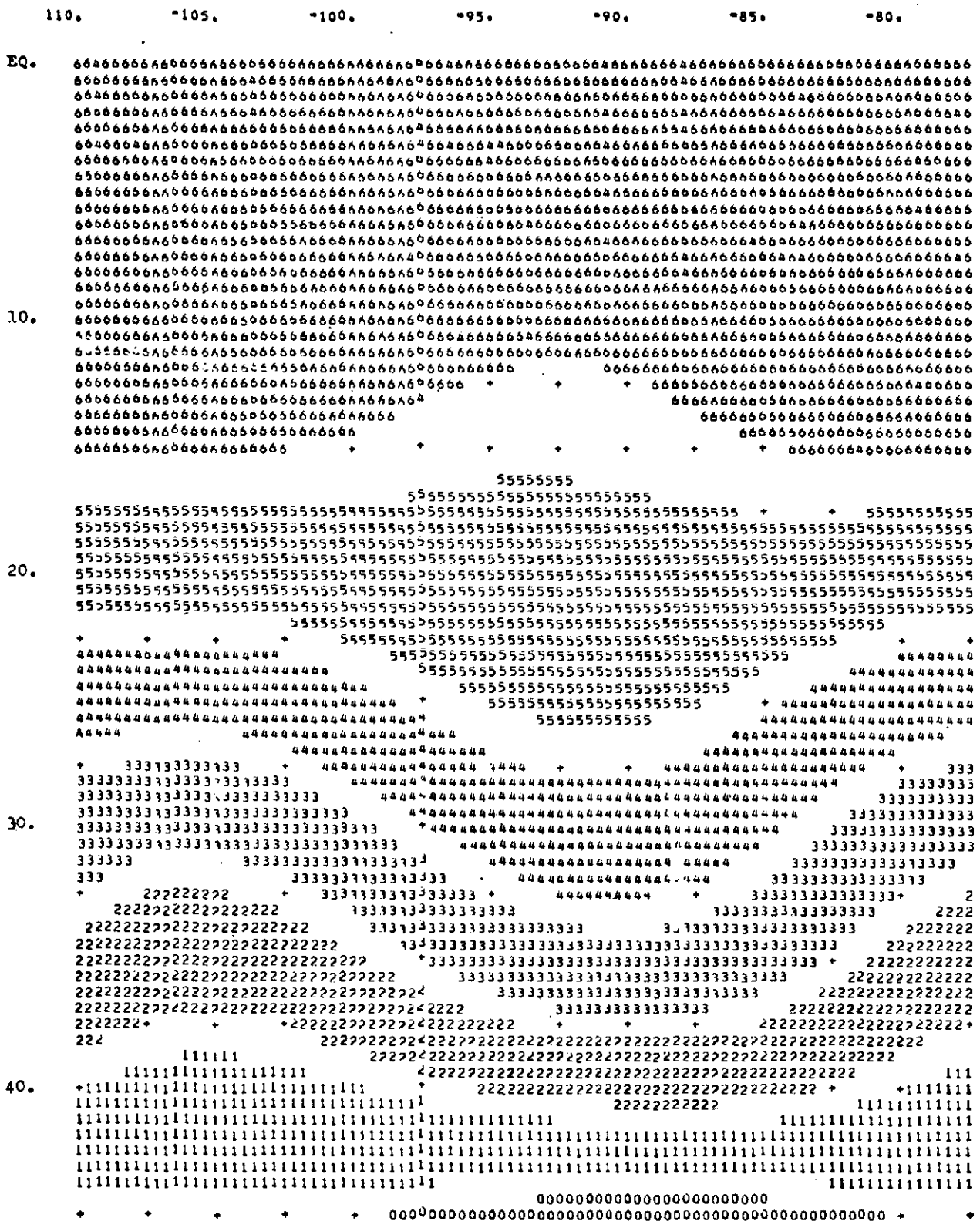
GAMBO= .1801E-01

VALOR CENTRAL DO BRANCO

2280. 2340. 2400. 2460. 2520. 2580. 2640. 2700. 2760. 2820.



Fig. A.29 CAMPO DO GEOPOTENCIAL APÓS 46 HORAS



MAXIMO MINIMO RANGE PASSO VAL. INIC ORDEM  
2629. 2651. 276. 60. 2280. 41E+01

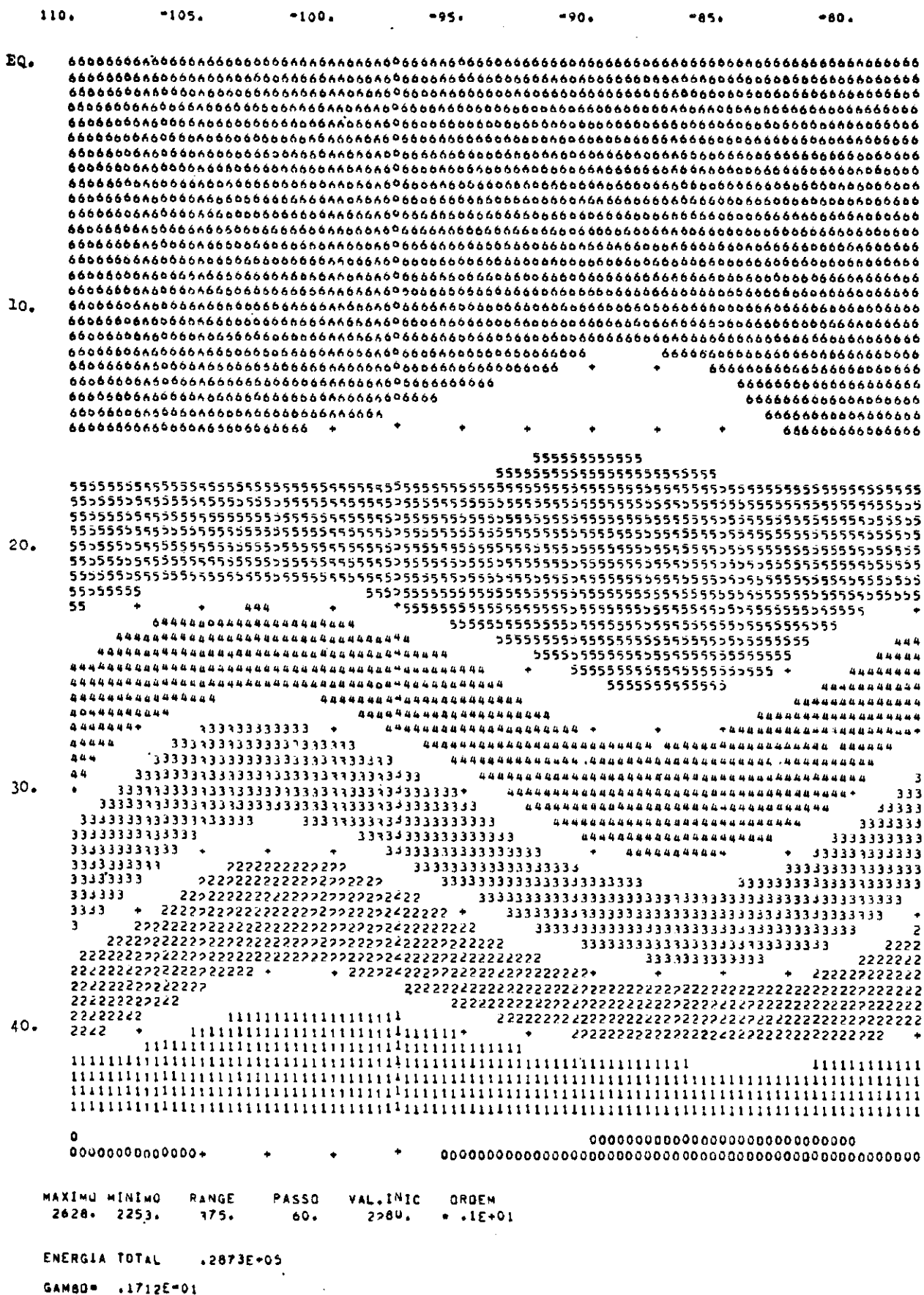
ENERGIA TOTAL .2885E+05

GAMBO .3219E-01

VALOR CENTRAL DO BRANCO

2280. 2340. 2400. 2460. 2520. 2580. 2640. 2700. 2760. 2820.

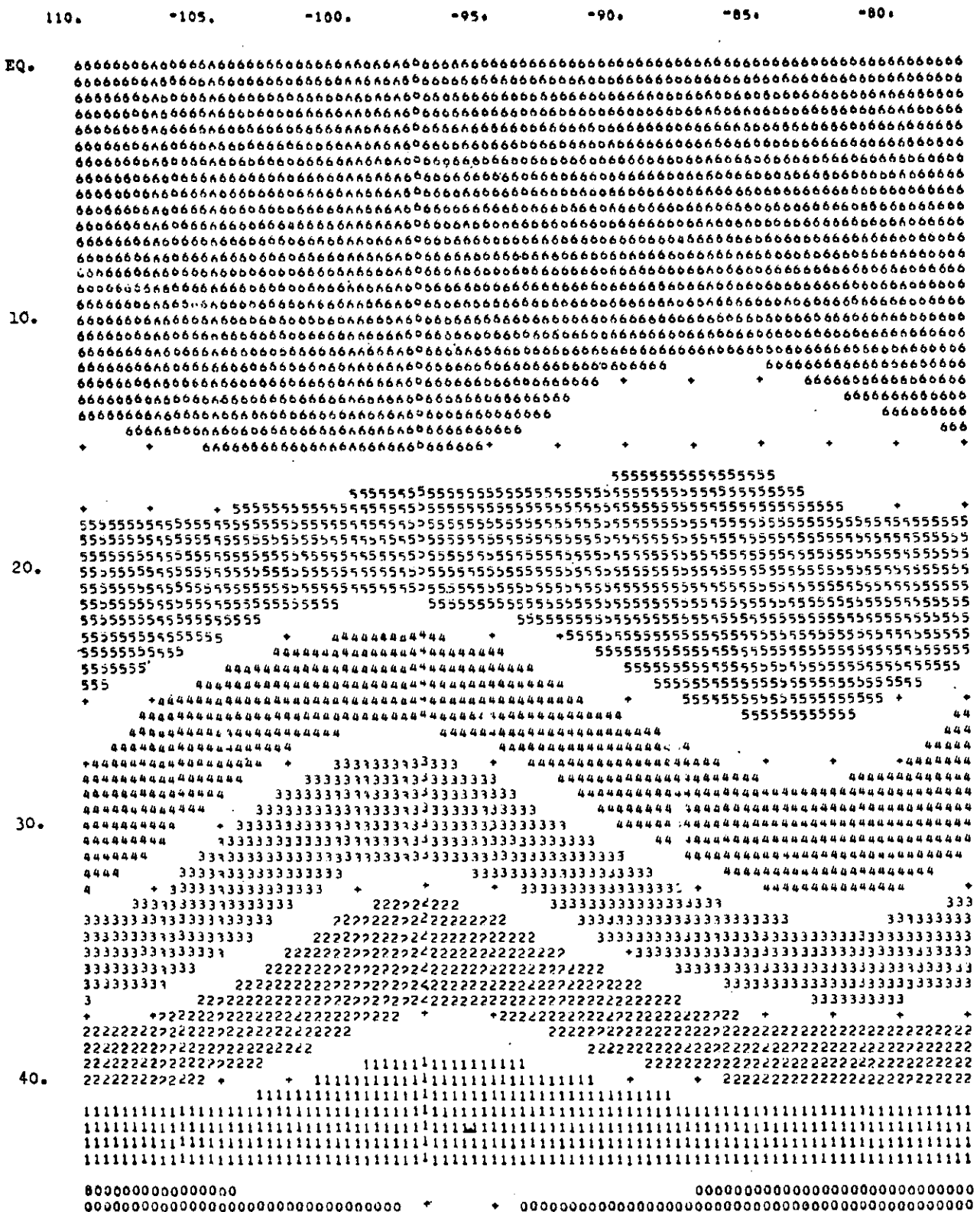
Fig. A.30 CAMPO DO GEOPOTENCIAL. APOS 48 HORAS



VALOR CENTRAL DO BRANCO

2280. 2340. 2400. 2460. 2520. 2580. 2640. 2700. 2760. 2820.

Fig. A.31 CAMPO DO GEOPOTENCIAL APOS 60 HORAS



|        |        |       |       |           |         |
|--------|--------|-------|-------|-----------|---------|
| MAXIMO | MINIMO | RANGE | PASSO | VAL. INIC | ORDEM   |
| 2628.  | 2254.  | 374.  | 60.   | 2280.     | • 1E+01 |

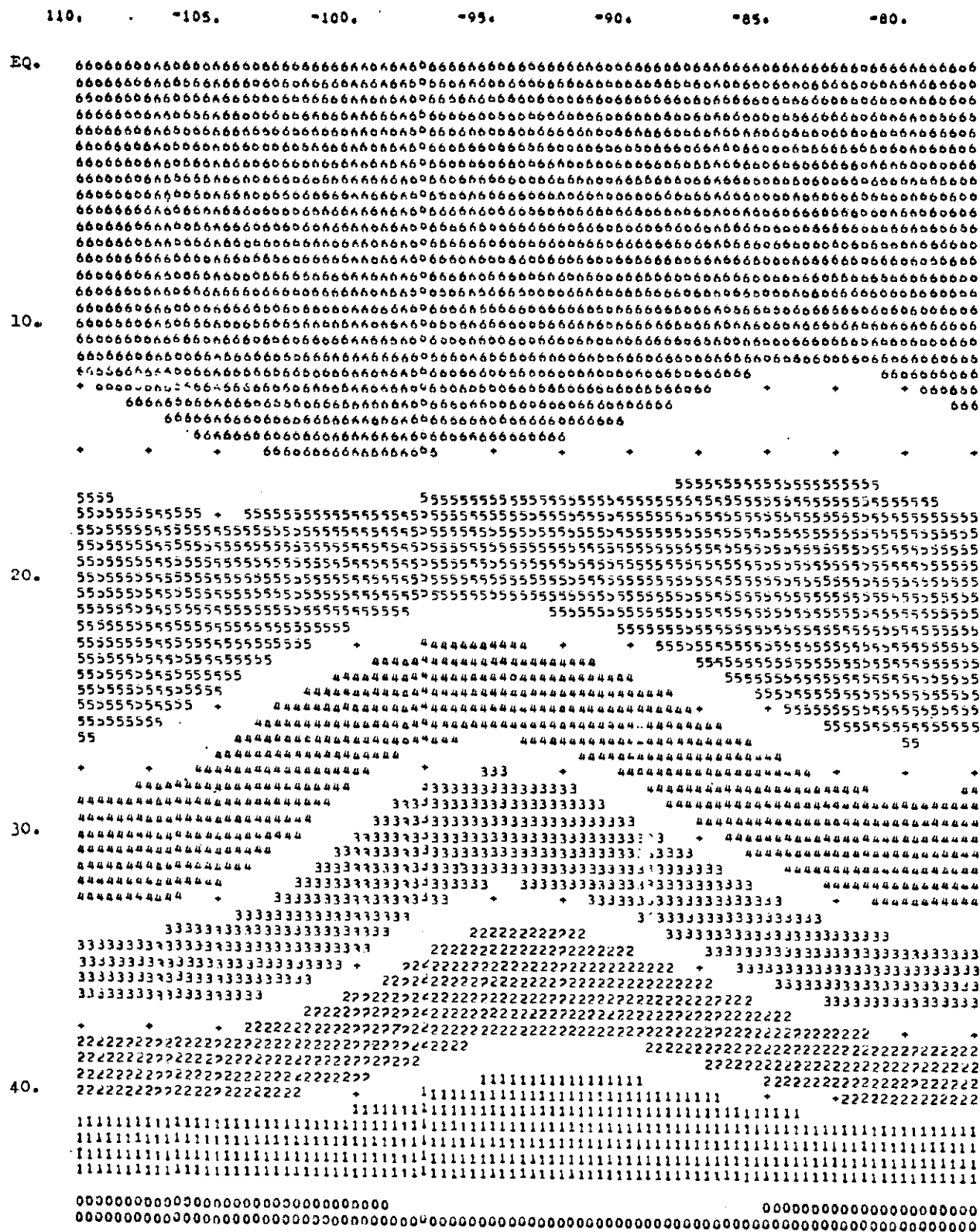
ENERGIA TOTAL 2862E+05

GAMBO= .1642E-01

VALOR CENTRAL DO BRANCO

2280. 2340. 2400. 2460. 2520. 2580. 2640. 2700. 2760. 2820.

Fig. A.32 CAMPO DO GEOPOTENCIAL APOS 72 HORAS



|        |        |       |       |          |          |
|--------|--------|-------|-------|----------|----------|
| MAXIMO | MINIMO | RANGE | PASSO | VAL.INIC | ORDEM    |
| 2627.  | 2251.  | 374.  | 60.   | 2200.    | * .1E+01 |

ENERGIA TOTAL .2854E+05

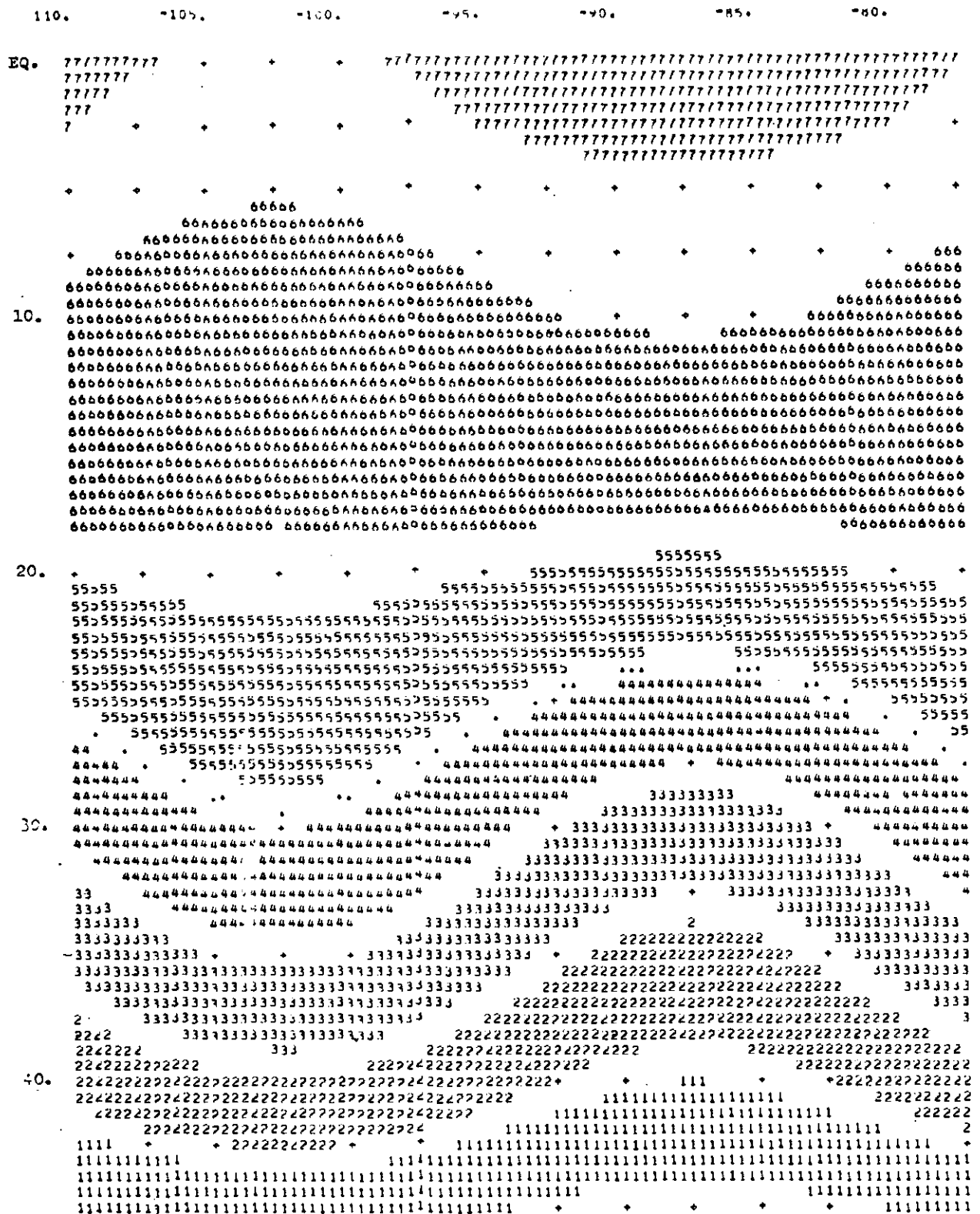
GAMBO= .2496E+01

VALOR CENTRAL DO BRANCO

2280. 2340. 2400. 2460. 2520. 2580. 2640. 2700. 2760. 2820.

Fig. A.33

CAMPO DO GEOPOTENCIAL INICIAL AJUSTADO



MAXIMO MINIMO RANGE PASSO VAL. INIC ORDEM  
130. -247. 177. 60. -247. \* .1E+01

ENERGIA TOTAL .2640E+03

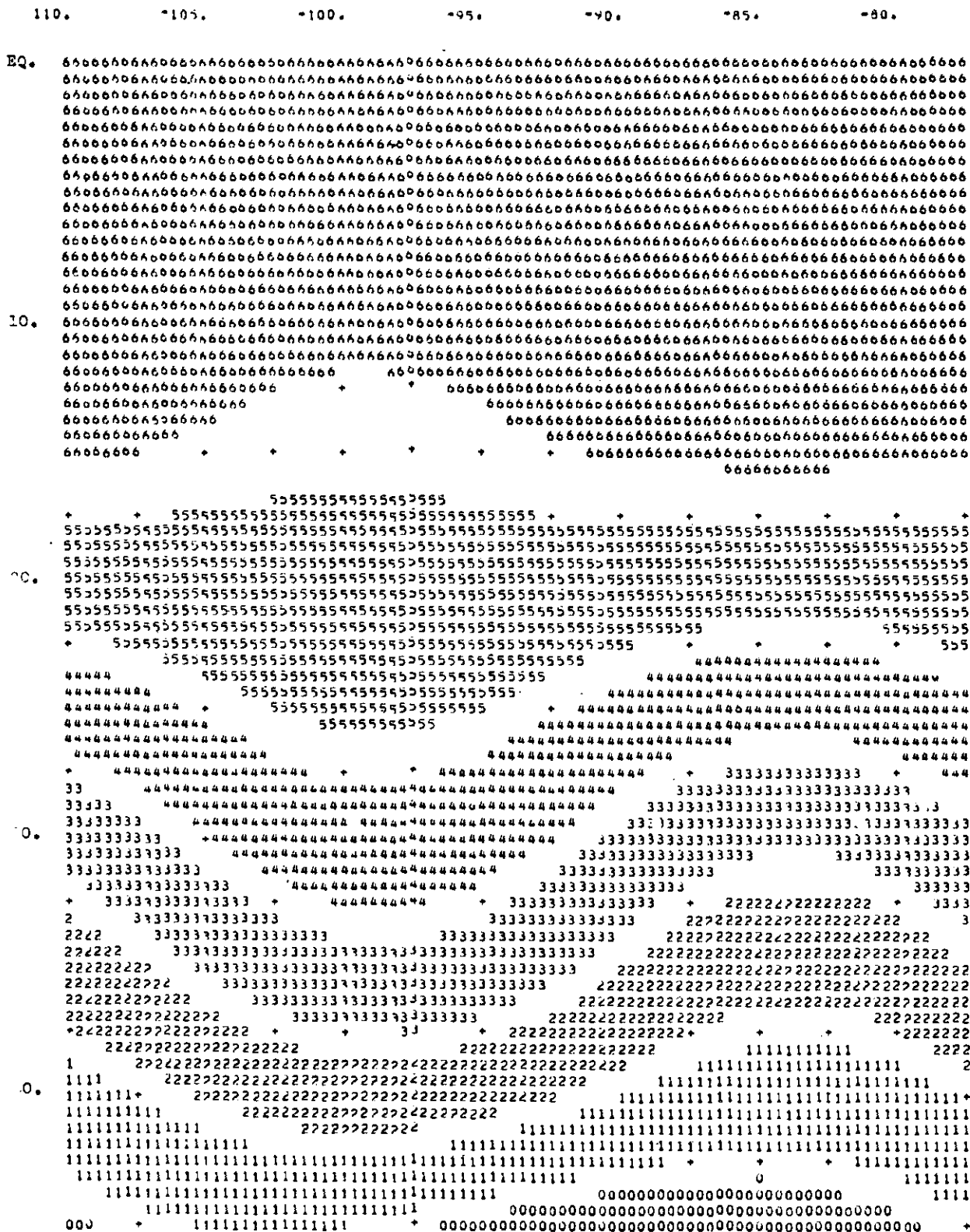
GAMMA= .4731E+01

CONDIÇÕES T

VALOR CENTRAL DO BRANCO

-240. -180. -120. -60. 0. 60. 120. 180. 240. 300.

Fig. A.34 CAMPO DO GEOPOTENCIAL APÓS 42 HORAS



|        |        |       |       |           |          |
|--------|--------|-------|-------|-----------|----------|
| MAXIMO | MINIMO | RANGE | PASSO | VAL. INIC | ORDEN    |
| 2629.  | 2242.  | 387.  | 60.   | 2700.     | * .1E+01 |

ENERGIA TOTAL .2915E+00

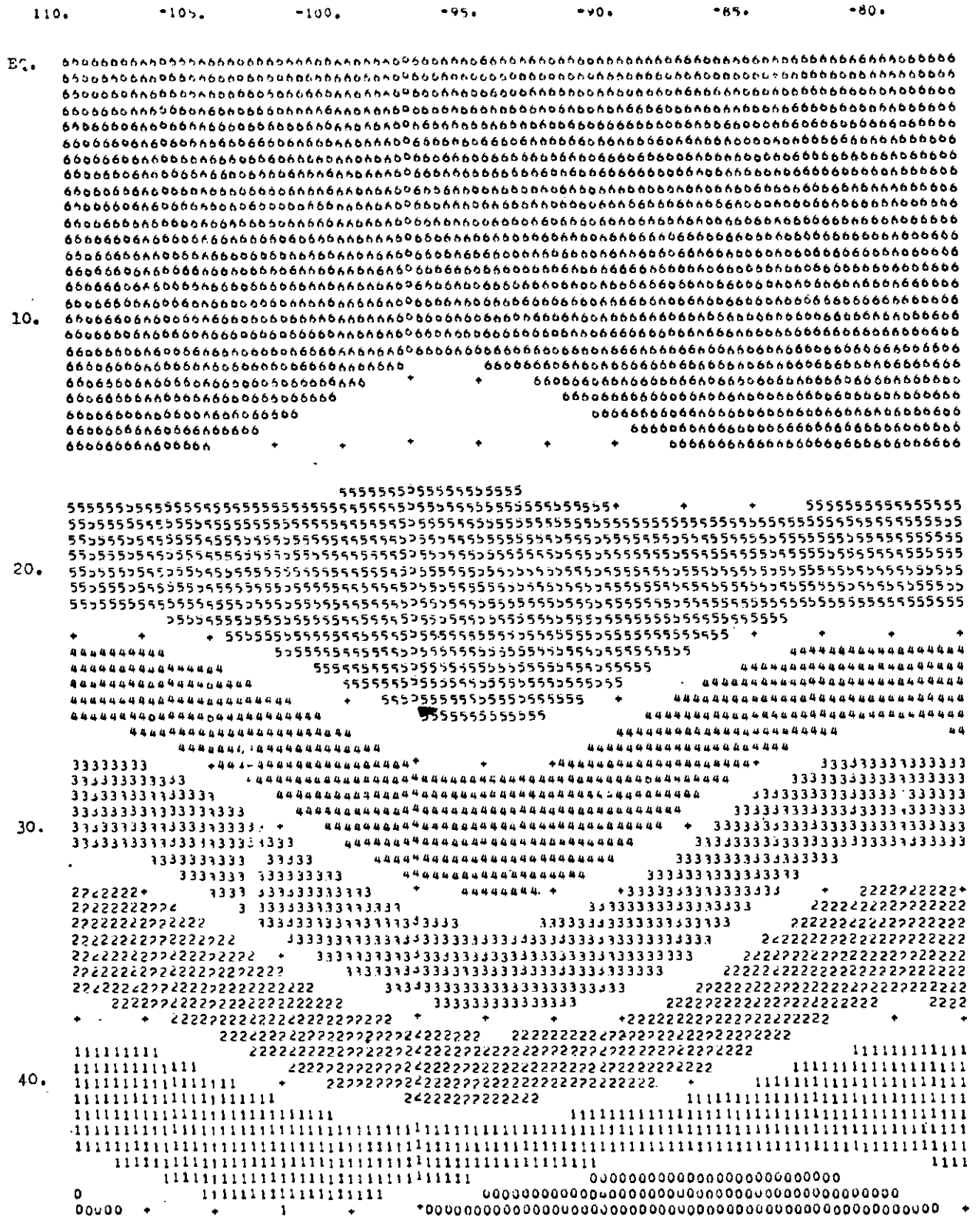
GAMMA= .1111E-01

VALOR CENTRAL DO BRANCO

2280. 2340. 2400. 2460. 2520. 2580. 2640. 2700. 2760. 2820.

Fig. A.35

CAMPO DO GEOPOTENCIAL APÓS 24 HORAS



|         |         |       |       |           |          |
|---------|---------|-------|-------|-----------|----------|
| MAXIMUM | MINIMUM | RANGE | PASSN | VAL. INIC | ORDER    |
| 2630.   | 2235.   | 394.  | 00.   | 2280.     | * .1E+01 |

ENERGIA TOTAL 2964E+00

GAMBO- 4505L-02

VALOR CENTRAL DO BRANCO

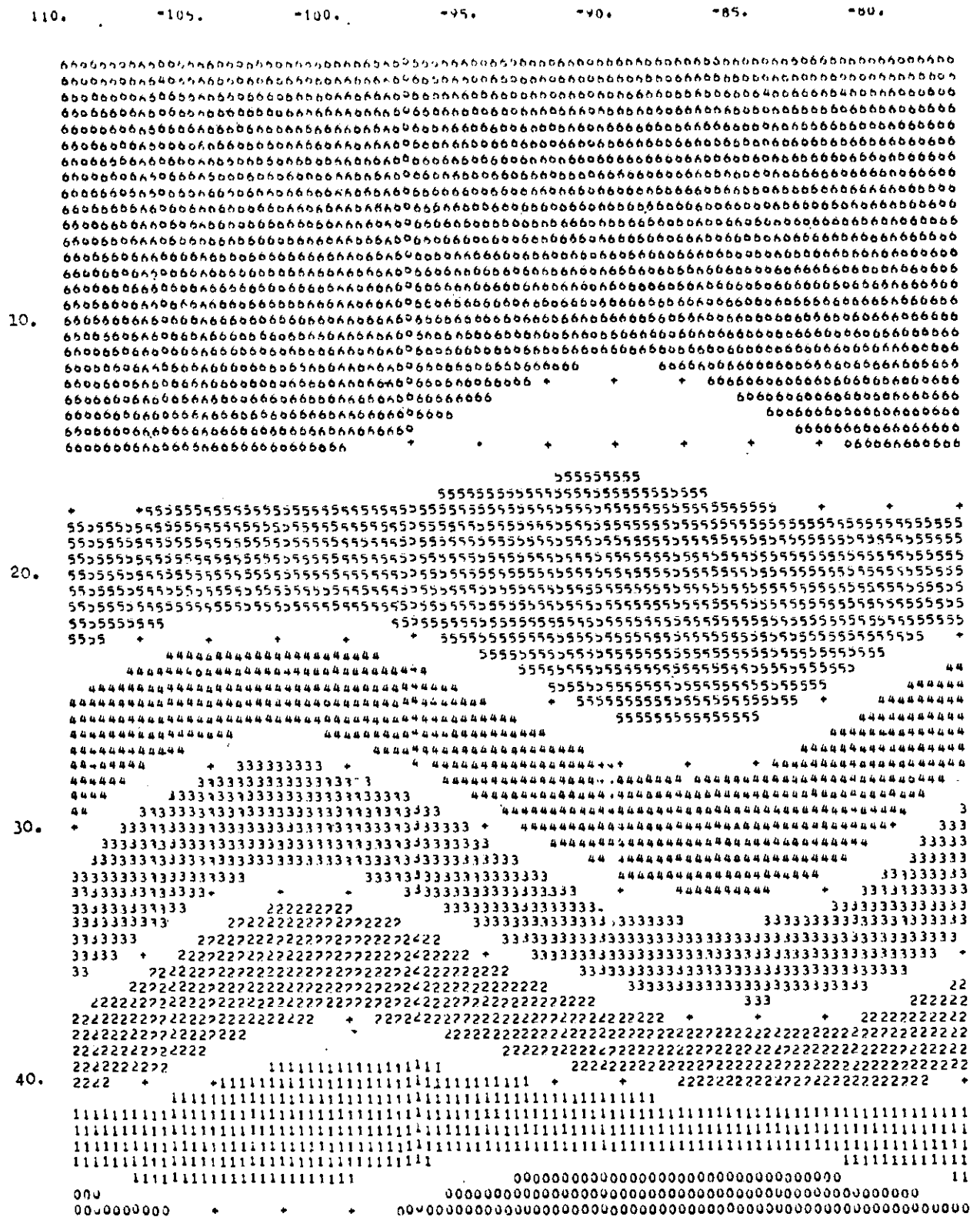
2280. 2340. 2400. 2460. 2520. 2580. 2640. 2700. 2760. 2820.

2280, 2340, 2400, 2460, 2520, 2580, 2640, 2700, 2760, 2820.



Fig. A.37

CAMPO DO GEOMOTECIAL APÓS 48 HORAS



MAXIMO MINIMO RANGE PASSO VAL. INIC DROE4  
2629. 2424. 403. 60. 2700. + .1E+01

ENERGIA TOTAL .2475E+05

GAMMA = .5914E+02

VALOR CENTRAL DO BRANCO

2280. 2340. 2400. 2460. 2520. 2580. 2640. 2700. 2760. 2820.

2280. 2340. 2400. 2460. 2520. 2580. 2640. 2700. 2760. 2820.

Fig. A.39 CAMPO DE GEOPOTENCIAL APUS 72 HORAS

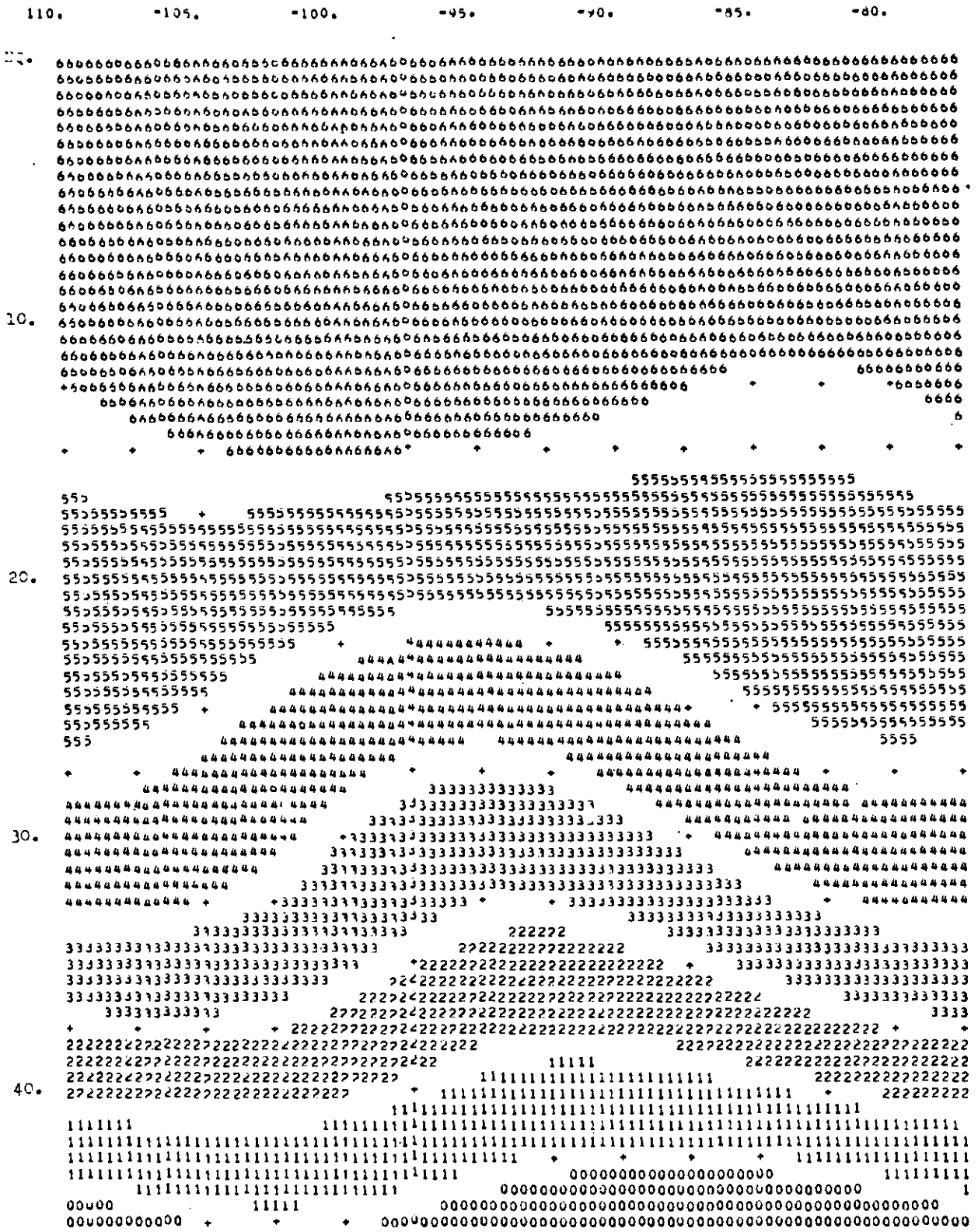


Fig. A.40

2000 00 SCIENTIFIC JUDICIAL ADJUST

[illegible]

| MAXIMUM WIND (KTS) | WIND DIRECTION | WIND SPEED (KTS) | WIND DIRECTION | WIND SPEED (KTS) | WIND DIRECTION |
|--------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| 130.               | 240.           | 177.             | 02.            | 240.             | * 11.01        |

ENERGIA TOTAL 0.05425-10

GAM37 = 47712-51

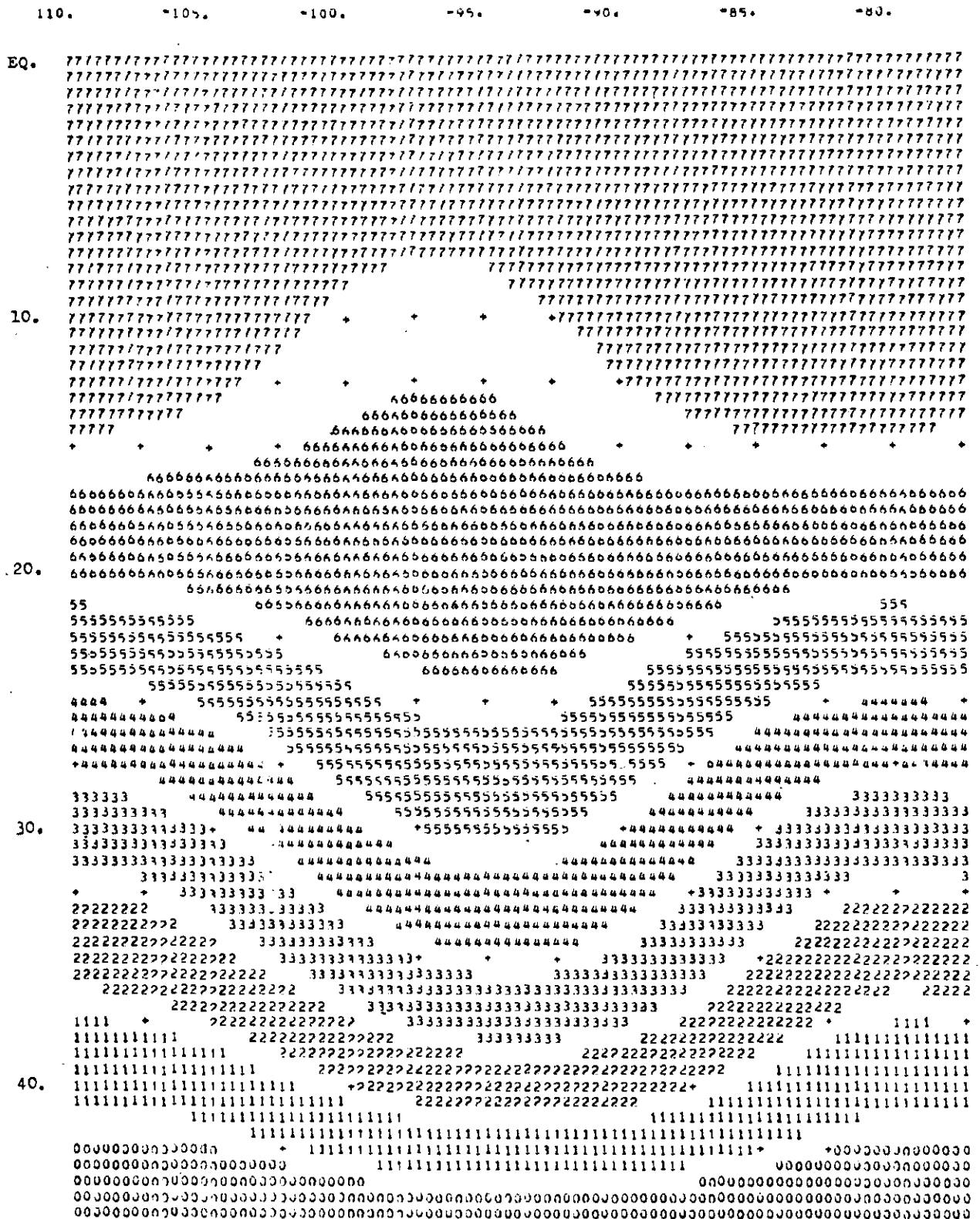
VALOR CENTRAL DO BRANCO

-240. -180. -120. -60. 0. 60. 120. 180. 240. 300.

### CONDIÇÕES E

2280. 2340. 2400. 2460. 2520. 2580. 2640. 2700. 2760. 2820.

Fig. A.42 CAMPUS DE GERMISTON TOTAL 2005 et 2006



| MAXIMUM | MINIMUM | RANGE | PASSO | VAL. I I C | ORDEM    |
|---------|---------|-------|-------|------------|----------|
| 2591.   | 2454.   | 137.  | 45.   | 2242.      | * .1E+01 |

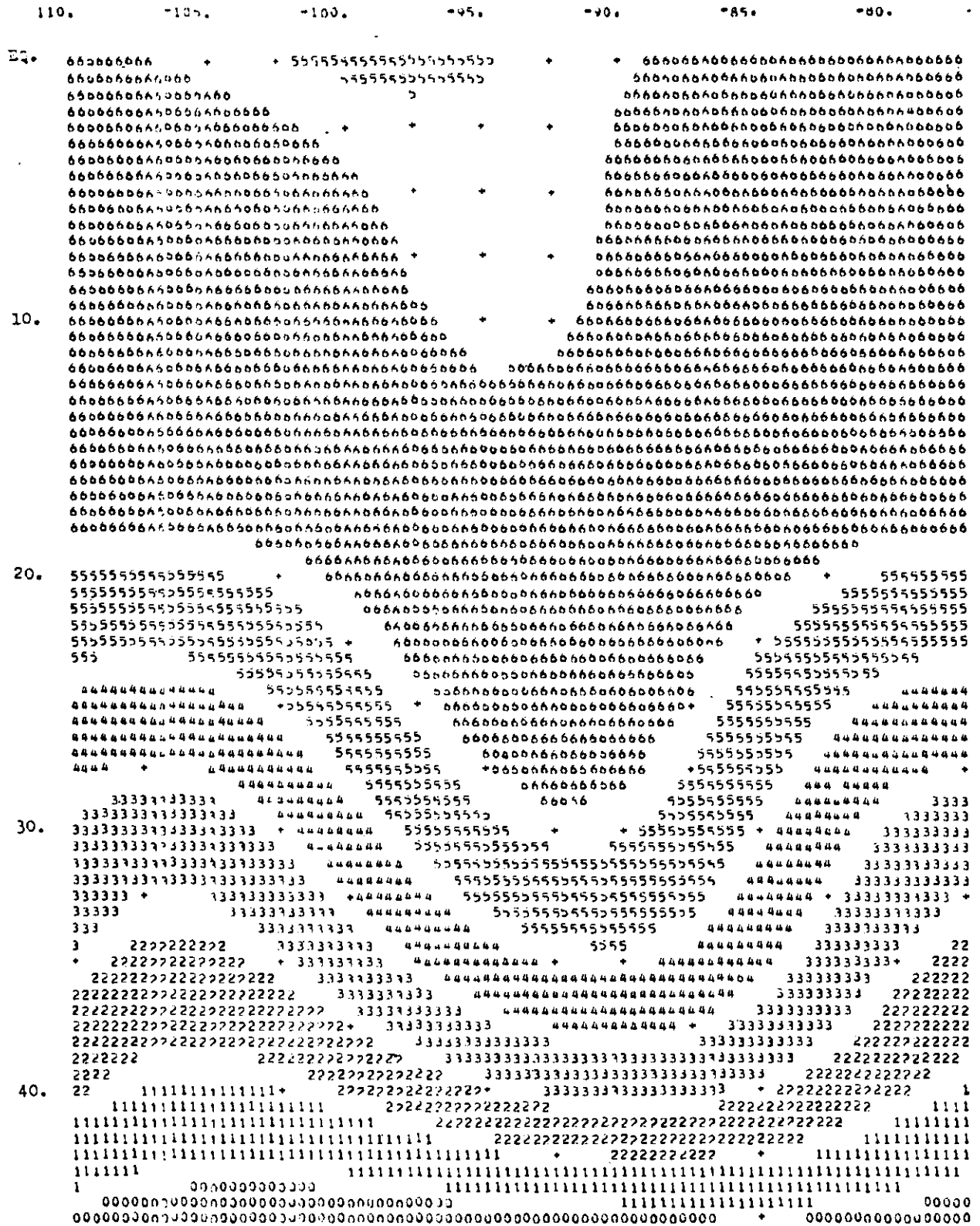
ENERGIA TOTAL 27048.00

GAMBO= .5043E+01

VALOR CENTRAL DO BRANCO

2295. 2340. 2385. 2430. 2475. 2520. 2565. 2610. 2655. 2700.

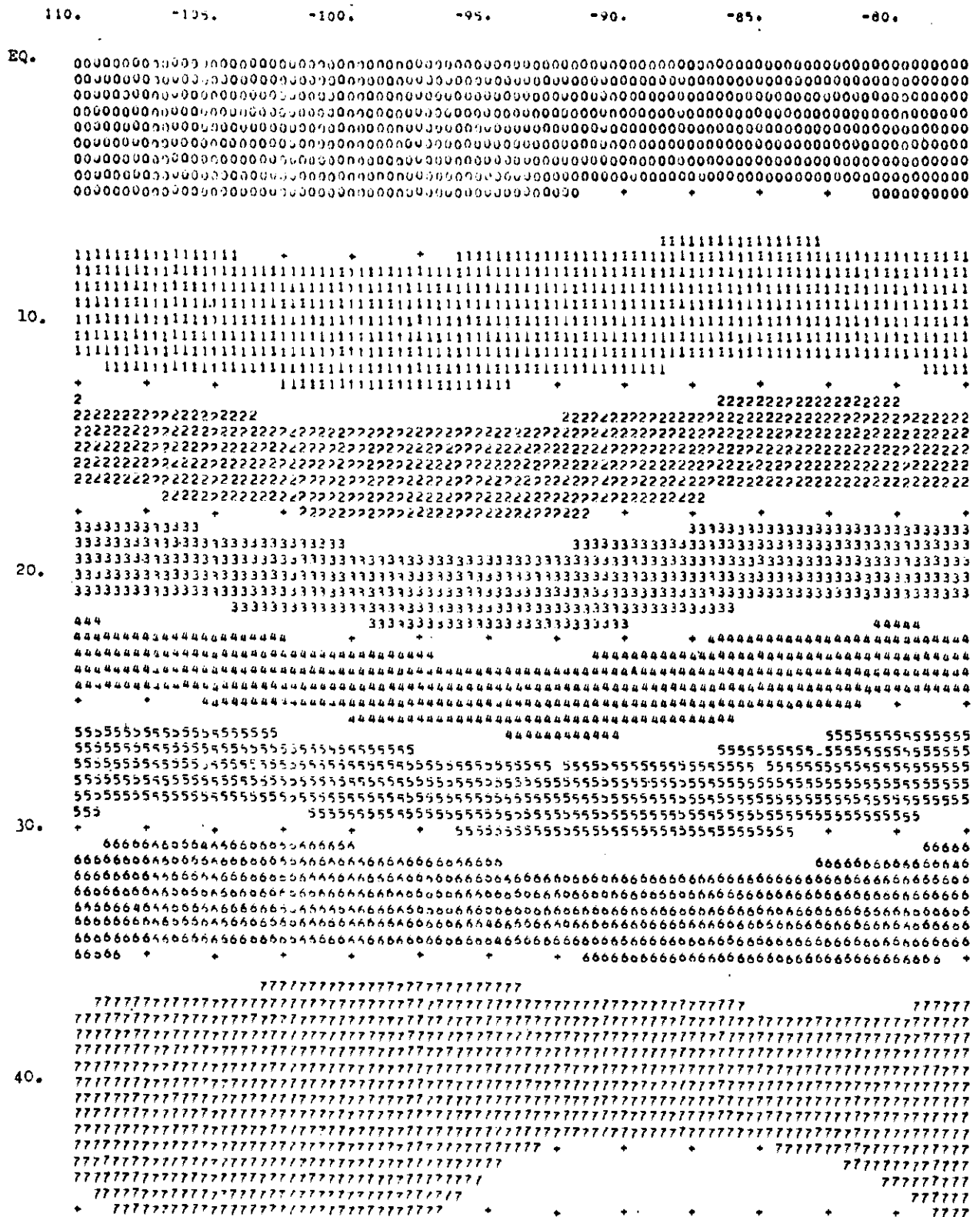
Fig. A.43 CAMPO DO GEOMETRICAL APOUS 30 MILES



2010. 2025. 2040. 2055. 2070. 2085. 2100. 2115. 2130. 2145.



Fig. A.46 CAMPO DO GEOPOTENCIAL APÓS 72 HORAS



| MAXIMUM MINIMUM | RANGE | MASS | VAL. INIC | TRDEN    |
|-----------------|-------|------|-----------|----------|
| 1890. 1200.     | ADD.  | 99.  | 1260.     | * .12+01 |

ENERGIA TOTAL .5435E+00

GAMBO = .4152E+00

VALOR CENTRAL DO BRANCO

1260. 1350. 1440. 1530. 1620. 1710. 1800. 1890. 1980. 2070.