

1. Classificação <i>INPE.COM.10-PE</i> CDU: 550.3A		2. Período <i>Junho 1978</i>	4. Critério de Distribuição: interna ☐ externa ☒
3. Palavras Chaves (selecionadas pelo autor) <i>Marés Solares, Sódio Mesosférico.</i>			
5. Relatório nº <i>INPE-1291-PE/142</i>	6. Data <i>Junho 1978</i>	7. Revisado por <i>Hisao Takahashi</i>	
8. Título e Sub-Título <i>ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DA MARE SOLAR NA CAMADA DE SÓDIO MESOSFÉRICO DURANTE O INVERNO</i>		9. Autorizado por <i>Nelson de Jesus Parada</i> Diretor	
10. Setor <i>DCE/GOA</i>		Código <i>30.372</i>	
12. Autoria <i>P.P. Batista B.R. Clemesha</i>		11. Nº de cópias <i>22</i>	
13. Assinatura Responsável <i>Paulo Prado</i>		14. Nº de páginas <i>21</i>	
15. Preço			
16. Sumário/Notas <i>Acompanhando as flutuações da densidade de sódio livre na camada dentre 76 a 104 Km de altura, medida pela técnica do Radar de Laser em São José dos Campos, SP, no inverno de 1976, procura-se determinar algumas características dinâmicas da região no campo de densidade atmosférica. Por meio de um ajuste, determina-se amplitudes e fases de ondas com períodos de 12 h e 24 h, que se mostram muito variáveis. Por meio de uma análise de correlações cruzadas entre os vários níveis estuda-se os comprimentos de onda verticais dominantes das marés.</i>			
17. Observações <i>Este trabalho foi parcialmente subvencionado pelo Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) através do Contrato FINEP-271 CT. Este trabalho será apresentado na XXX Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência - SBPC a ser realizada em julho de 1978, em São Paulo, SP.</i>			

ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DA MARÉ SOLAR NA CAMADA
DE SÓDIO MESOSFÉRICO DURANTE O INVERNO

por

P.P. Batista e B.R. Clemesha

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq

12200 São José dos Campos, SP, Brasil

SUMÁRIO

Acompanhando as flutuações da densidade de sódio livre na camada entre 76 a 104 Km de altura, medida pela técnica do Radar de Laser em São José dos Campos, SP, no inverno de 1976, procura-se determinar algumas características dinâmicas da região no campo de densidade atmosférica. Por meio de um ajuste, determina-se amplitudes e fases de ondas com períodos de 12 h e 24 h, que se mostram muito variáveis. Por meio de uma análise de correlações cruzadas entre os vários níveis estuda-se os comprimentos de onda verticais dominantes das marés.

1. INTRODUÇÃO

O estudo da região da atmosfera neutra correspondendo à alta mesosfera e baixa termosfera (75 a 105 Km aproximadamente), tem sido motivado por duas principais peculiaridades da região: Sua forte atividade fotoquímica e sua dinâmica. A absorção da energia solar pelas moléculas da atmosfera produz dissociações que, por sua vez, dão origem a reações posteriores, levando à existência de diversos constituintes minoritários. Átomos de metais alcalinos também se encontram nessa região, depositados provavelmente por meteoros. Ondas de gravidade internas e marés, geradas na troposfera e estratosfera, propagando-se para cima atingem, nessa região, suas maiores amplitudes, devido à conservação de energia e porque os efeitos dissipativos são ainda pequenos nessas alturas.

Diversos métodos experimentais tem sido utilizados para medir parâmetros relevantes nessa região. Em particular, a densidade de átomos de sódio livres, em uma camada centrada em torno de 90Km, tem sido medida em São José dos Campos, SP, desde 1972, pela técnica do radar de laser. Certamente, esses dados são úteis para o estudo fotoquímico e dinâmico da região.

Neste relatório estamos interessados em movimentos oscilatórios de períodos longos que se manifestam na camada.

2. MOVIMENTOS TIPO-ONDA NA CAMADA DE SÓDIO

O radar de laser do INPE, situado em São José dos Campos, SP ($23^{\circ}12'S$, $45^{\circ}51'W$) tem sido utilizado desde 1972 para medir a densidade de átomos de sódio livres, na camada situada entre 76 a 106 quilômetros de altura. As primeiras medidas obtidas são relatadas por Kirchhoff e Clemesha (1972). Detalhes sobre o sistema de aquisição de dados e a calibração absoluta do sinal recebido são dados, respectivamente, por Clemesha e Simonich (1975) e Simonich e Clemesha (1976).

Quando se observa uma série de perfis de sódio, tomados sequencialmente ao longo de uma noite, nota-se que esses perfis apresentam certas estruturas persistentes que não são estáticas, mas que se propagam, geralmente, de maiores alturas para alturas mais baixas ao longo da noite.

Na Figura 1 mostramos uma sequência de perfis tomados na noite de 25-26 de julho de 1976. Os perfis apresentados, são as médias de cada trinta minutos. Notamos facilmente na figura, que, no início da noite, a camada apresenta uma estrutura de dois picos que vão se propagando para baixo ao longo da noite. Por volta da meia noite o pico inferior já quase desapareceu na extremidade inferior da camada, enquanto que, na parte superior, a densidade começa aumentar, parecendo ser a continuação de um máximo que entra pela parte superior da camada. O pico principal da camada propaga-se monotonicamente para baixo. Essas perturbações tornam-se ainda mais evidentes visualmente quando apresentadas como na Figura 2. Aqui são apresentados os desvios da densidade

de sódio em relação à média noturna, em unidades de desvio padrão, onde a densidade é também normalizada a fim de dar a mesma abundância. Vê-se claramente picos de máximos e mínimos propagando-se para baixo ao longo do tempo. Mediante uma análise dos dados de algumas noites individuais, usando figuras semelhantes à Figura 2, Batista et al. (1976), mostraram que as estruturas do tipo onda, que apareciam nessas noites, eram consistentes com a perturbação esperada na densidade atmosférica, produzida pela propagação da maré solar diurna, prevista pela teoria clássica das marés atmosféricas (Chapman e Lindzen, 1970).

Embora, praticamente, todos os dados apresentem o caráter geral de propagação de fase de cima para baixo, as fases e comprimentos de ondas aparentes apresentam grande variabilidade de dia para dia. A fim de procurar alguma característica comum a vários dias, ou alguma relação dia a dia entre os comprimentos de onda vertical e fases encontrados, fizemos uso de dados tomados durante o inverno de 1976, quando diversas medidas de noite inteira foram tomadas em dias seguidos, com o radar de laser.

3. COMPONENTES DE 12 h E 24 h

Nas medidas aqui estudadas, o radar de laser fornece dados da densidade de sódio com resolução vertical de 2 quilômetros e temporal de 10 minutos. Assim, para cada altura, de 2 em 2 quilômetros temos uma série temporal com espaçamento de 10 minutos entre os pontos. Estas séries são analisadas para mostrar as amplitudes e fases das principais componentes periódicas da oscilação. Uma simples análise de

Fourier não dá bons resultados, principalmente porque os dados são restritos ao período máximo de 12 horas e temos sobre eles oscilações de 24 horas e flutuações não periódicas, devidas a variações da densidade de sódio por motivos fotoquímicos e variação da fonte. Além do mais, os dados estão imersos em substancial ruído. O que é feito então, é ajustar, pelo método dos mínimos quadrados, uma componente estacionária e as amplitudes e as fases de uma onda diurna e semidiurna como na fórmula (1).

$$A_{h,t} = A_{0,h} + A_{D,h} \cos \left(\frac{2\pi}{24} t - \phi_{D,h} \right) + A_{S,h} \cos \left(\frac{2\pi}{12} t - \phi_{S,h} \right) \quad (1)$$

Onde: $A_{h,t}$ = Amplitude medida no tempo t e na altura h .

$A_{0,h}$ = Amplitude estacionária na altura h .

$A_{D,h}$, $\phi_{D,h}$ = Amplitude e fase da componente ajustada de 24 horas na altura h .

$A_{S,h}$, $\phi_{S,h}$ = Amplitude e fase da componente ajustada de 12 horas na altura h .

Certamente, a estimativa de uma onda diurna, tirada de dados tomados sobre, no máximo, 12 horas, não é muito confiável. Entretanto, desde que a oscilação diurna seja bastante forte podemos ter uma idéia da fase da mesma. Fazendo isso para várias alturas, podemos inferir o comprimento de onda vertical da oscilação.

Duas principais sequências de dados foram estudadas. A primeira compreende os dias 21 a 27 de junho de 1976 e, a segunda, os dias 22 de julho a 3 de agosto de 1976. Na Figura 3 mostramos as fases

ajustadas para dois dias consecutivos de uma das seqüências. Figura 3 (a) mostra a fase da componente de 24 horas e Figura 3 (b), a fase da componente de 12 horas. Em ambas as figuras a característica de propagação de fase de cima para baixo é evidente. Na Figura 3 (a) aparece uma propagação com um comprimento de onda vertical de 25-30 Km, o que concorda com as previsões da teoria clássica das marés atmosféricas. Na Figura 3 (b), embora as características de propagação sejam também evidentes, o comprimento de onda mostrado é de cerca de 30 Km, muito pequeno em comparação com o previsto pela teoria. Esses comprimentos de onda curtos, embora não concordando com a teoria, são encontrados, às vezes, em medidas de ventos por meio de radar meteorológico na mesma região de altura (Fellous et al., 1974).

Foi nosso propósito, também, nesta análise, estudar o comportamento das fases das oscilações em dias seqüenciais. Os dois dias consecutivos da Figura 3 mostram grande semelhança, mas este não é o caso geral. Fazendo-se o ajuste sobre uma seqüência de dias, em vez de dias individuais, as vezes uma certa semelhança se mantém por 3 ou 4 dias, no máximo, com a amplitude ajustada não decrescendo muito. Este é o caso mostrado na Figura 4, onde o ajuste é feito sobre uma seqüência de quatro dias (21 a 24.06.76). Porém, no caso mais geral, pouca ou nenhuma semelhança entre as fases existe de um dia para outro, principalmente na componente de 24 horas. Na Figura 5 mostramos a quantidade

$$r = 1/16 \sum_{i=1}^{16} A_i,$$

onde A_i é a amplitude ajustada para cada uma das 16 alturas. O ajuste

é feito começando pelo primeiro dia da sequência e aumentando até 13 dias da série de 22 de julho a 3 de agosto de 1976. O símbolo ($\cdot$) representa o r determinado com as amplitudes da onda de 24 horas e o símbolo (0), o mesmo para a onda de 12 horas. Notamos que, para o primeiro caso, r decresce aproximadamente proporcional com $1/\sqrt{N}$ (onde N é o número de dias) também representado na figura pelas curvas contínuas, indicando uma aleatoriedade das fases de dia para dia. Para o caso da onda de 12 horas, r permanece quase constante, o que poderia indicar uma manutenção da fase dia a dia. Porém, isso pode ser parcialmente motivado pela pequena amplitude do primeiro dia da sequência.

4. CORRELAÇÃO ENTRE DIFERENTES ALTURAS

A separação em componentes, de 12 e 24 horas, mostra que a fase das oscilações varia muito de dia para dia. Tal variação de fase pode ocorrer permanecendo, porém, o comprimento de onda vertical aproximadamente constante. Para verificar se o comprimento de onda vertical é uma característica comum a todo o conjunto de dados, foram feitas as correlações, com deslocamento de tempo, entre cada altura e uma altura de referência. Para fazer a correlação, consideramos a série de vários dias como uma única; as partes do dia onde não há dados aparecem como lacunas. É dado um deslocamento máximo de 6 horas para cada lado e as correlações cruzadas, assim determinadas, são analisadas nas componentes de Fourier. O primeiro harmônico (ie, o de 12 h) é visto ser altamente dominante, o que, à primeira vista, parece indicar a dominância daquela componente. Porém, isso é devido ao fato de que a função de correlação estimada, de séries que contenham períodos

de duas vezes a extensão dos dados ser muito semelhante à função de correlação de uma onda de período igual à extensão dos dados.

Na Figura 6 são mostradas as fases do primeiro harmônico das funções de correlação cruzadas, entre cada altura e a altura de 92 Km. A Figura 6 (a) corresponde à sequência de 13 dias de julho - agosto e a Figura 3 (b) corresponde à sequência de 7 dias em junho de 1976. Três importantes aspectos são notados nas figuras. São eles:

- 1) Há uma tendência geral da fase de propagar-se de cima para baixo com comprimento de onda longo.
- 2) Sobre a tendência geral há uma propagação de comprimento de onda mais curto, que produz um salto de aproximadamente 90 graus em fase de 94 a 96 Km.
- 3) Essas características existem em ambas as séries.

A tendência geral indica uma propagação de fase de 2.8 Km/h no caso (a) e 4.7 Km/h no caso (b). A grande mudança de fase, em torno de 92 Km, é um fato que chama a atenção. Para investigar isso, na Figura 7 são mostradas as fases da componente de 12 h para cinco dias individuais da sequência de julho de 1976. Nesta figura, a altura de referência escolhida foi 86 Km por dar, em geral, melhor correlação com outras alturas. Notamos que, em quatro dos cinco dias, a fase a 96 - 98 Km está pouco deslocada em relação a 86 Km. Acima de 98 Km e abaixo de 86 Km, as fases de quatro dos cinco dias seguem a mesma tendência. Entre 86 e 98 Km, notamos que, nos dias 23 e 24, a fase segue a tendência, com alguma perturbação enquanto que, para os outros dias, há um salto de um comprimento de onda nesse intervalo. Isto parece indi

car a existência de um comprimento de onda grande, que pode ser uma mistura dos primeiros modos semidiurnos, importante sobre toda a camada, enquanto que, em torno dos 90 Km, onde é maior a densidade de sódio, há maior sensibilidade aos modos diurnos com pequenos comprimentos de onda e a ondas de gravidade internas.

5. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Dados da densidade de átomos de sódio mesosférico, tomados durante o inverno de 1976, foram analisados a fim de identificarmos oscilações de marés na camada. Existem diversas limitações e incertezas em estudar essas oscilações com base em dados de sódio. A principal delas é supor que as variações da densidade de sódio acompanham as variações da densidade atmosférica. A variação noturna média, da camada de sódio, tem sido estudada por Simonich et al. (1978). Eles mostram que há um apreciável aumento da densidade de sódio na extremidade superior da camada e um decréscimo na extremidade inferior, ao longo da noite. Estas variações são atribuídas a efeitos fotoquímicos na parte inferior e à difusão na parte superior. Certamente esses efeitos podem alterar as fases determinadas nos itens 3 e 4.

A decomposição em ondas, de períodos de 12 e 24 horas, mostra que em dias individuais ou em poucos dias consecutivos existe uma oscilação diurna que pode ser identificada com o modo $S_{1,1}$ da maré diurna. Em vários dias a fase altera-se quase que aleatoriamente. A componente de 12 horas, determinada, mostra propagação com comprimentos de onda mais curtos que o esperado.

A análise das correlações entre várias alturas mostra uma tendência geral do pico de correlação, em se propagar com velocidade de fase de 3 a 5 Km/h. Na região entre 86 a 98 Km há evidências da existência de comprimentos de ondas mais curtos.

AGRADECIMENTOS

Os dados estudados foram obtidos num esforço conjunto do pessoal do laboratório Laser, com participação dos autores, dos doutores D.M. Simonich e V.W.J.H. Kirchhoff. Agradecemos também a H. Takaahashi pela colaboração em diversos aspectos, e ao Eng. S. Domingos e ao técnico J.P. Gama, encarregados da manutenção dos equipamentos.

REFERÊNCIAS

- BATISTA, P.P.; CLEMESHA, B.R. e SIMONICH, D.M. *Observações de Marés Atmosféricas na Mesosfera pela Técnica do Radar de Laser*. INPE-896-PE/021, 1976.
- CHAPMAN, S. e LINDSEN, R.S. *Atmospheric Tides*. Dordrecht, D.Reidel, New York, Gordon and Breach/Science, publ., 1970.
- CLEMESHA, B.R. e SIMONICH, D.M. *A Calculator based Data Acquisition System for a Laser Radar*. INPE-782-PE/001, 1975.
- FELLOUS, J.L.; SPIZZICHINO, A.; GLASS, M. e MASSEBEUF, M. Vertical Propagation of Tides at Meteor Hights. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 36, 385-396, 1974.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H. e CLEMESHA, B.R. Atmospheric Sodium Measurements at 23°S. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 35, 1493-1498, 1973.
- SIMONICH, D.M. e CLEMESHA, B.R. *Accurate Calibration of Lidar Returns of Atmospheric Sodium Measurements*. INPE-804-PE/013, 1976.
- SIMONICH, D.M.; CLEMESHA, B.R. e KIRCHHOFF, V.W.J.H. *Nocturnal and Seasonal Variation in the Mesospheric Sodium Layer*. INPE-1215-PE/121, 1978.

LEGENDAS DAS FIGURAS

Fig. 1 - Variações do perfil medido de sódio com a altura e tempo na noite de 25-26.07.76.

Fig. 2 - Desvio da densidade de sódio da média noturna, em unidades de desvio padrão na noite de 25-26.07.76.

Fig. 3 - Fase das componentes de 24 h (a) e 12 h (b) —•— 21-22.06.76, o---o 22-23.06.76.

Fig. 4 - Fase das componentes de 24 h (a) e 12 h (b). Ajuste sobre quatro dias consecutivos 21-24.06.76.

Fig. 5 - Amplitude média determinada em função do número de dias usados no ajuste. Curva contínua proporcional a $1/\sqrt{N}$. (•) ajuste diurno. (o) ajuste semidiurno.

Fig. 6 - Fase da componente de 12 h da função de correlação entre 92 Km e outras alturas. (a) Sequência de 22 de julho a 3 de agosto de 1976. (b) Sequência de 21 a 27 de junho de 1976.

Fig. 7 - Fase da componente de 12 h da função de correlação entre 86 Km e outras alturas para cinco dias escolhidos. Veja o texto para detalhes.

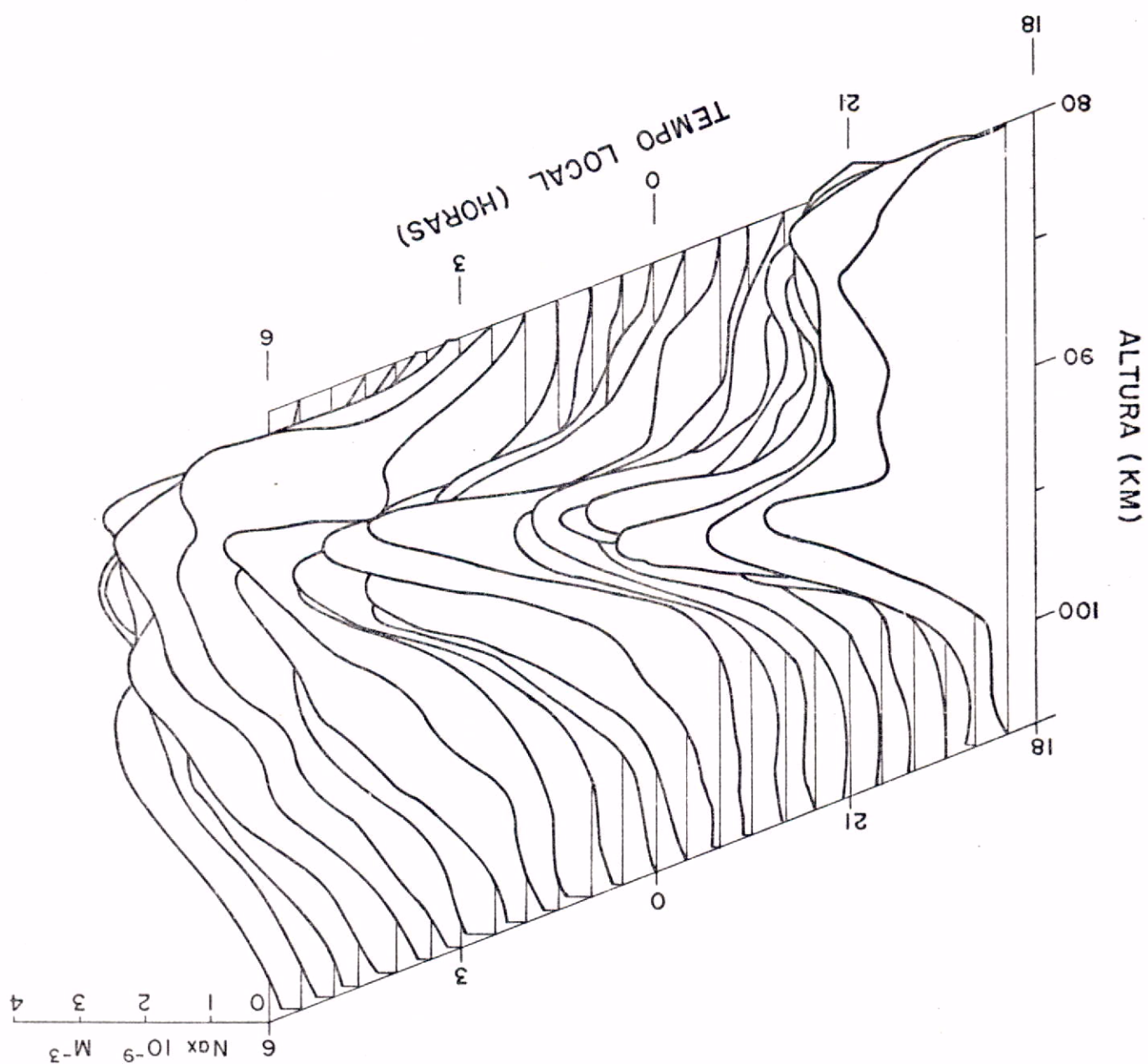


Fig. 1 - Variação do perfil medido de sódio com a altura e tempo na noite de 25-26.07.76.

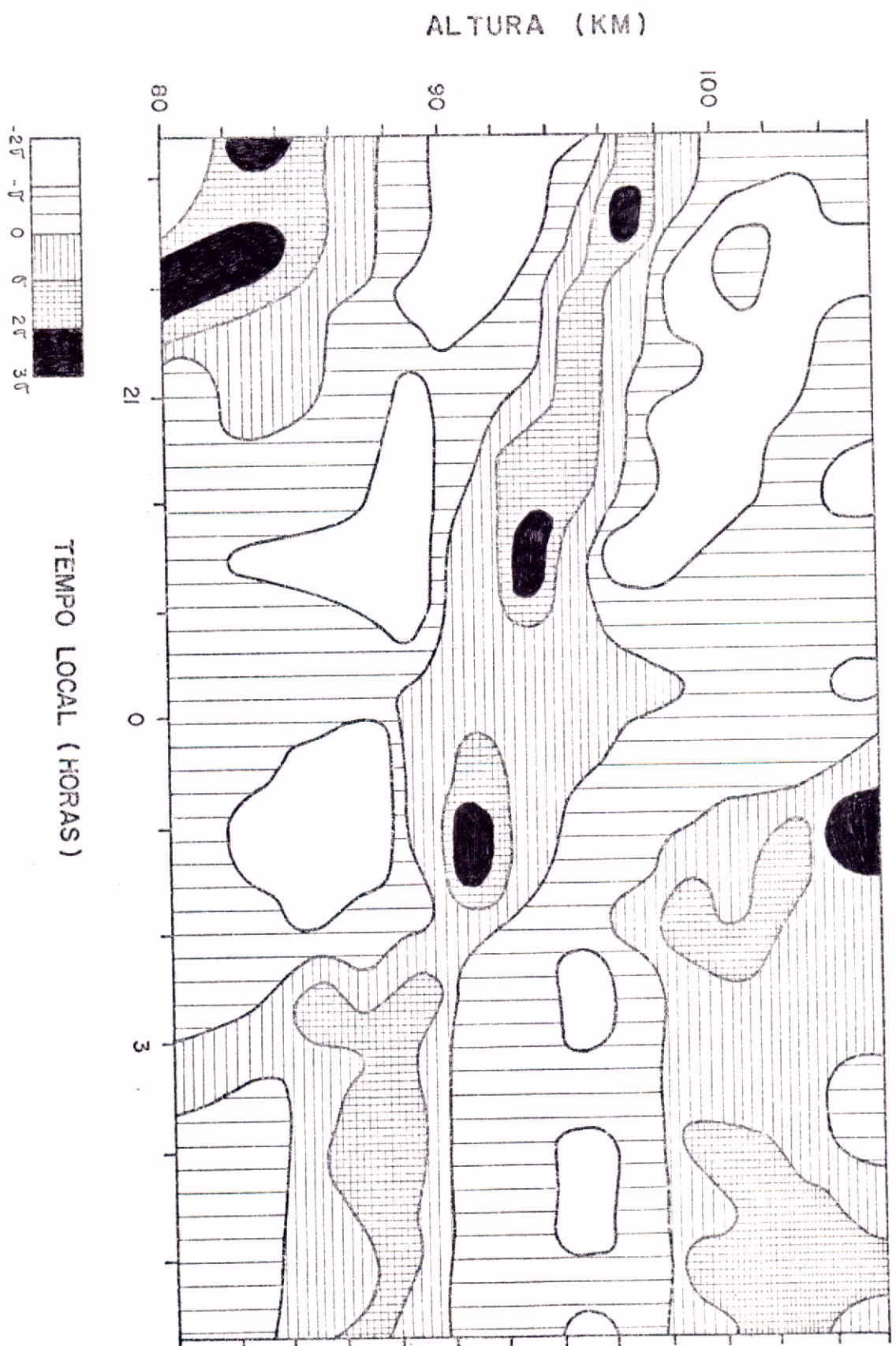


Fig. 2 - Desvio da densidade de sódio da média noturna, em unidades de desvio padrão na noite de 25-26.07.76.

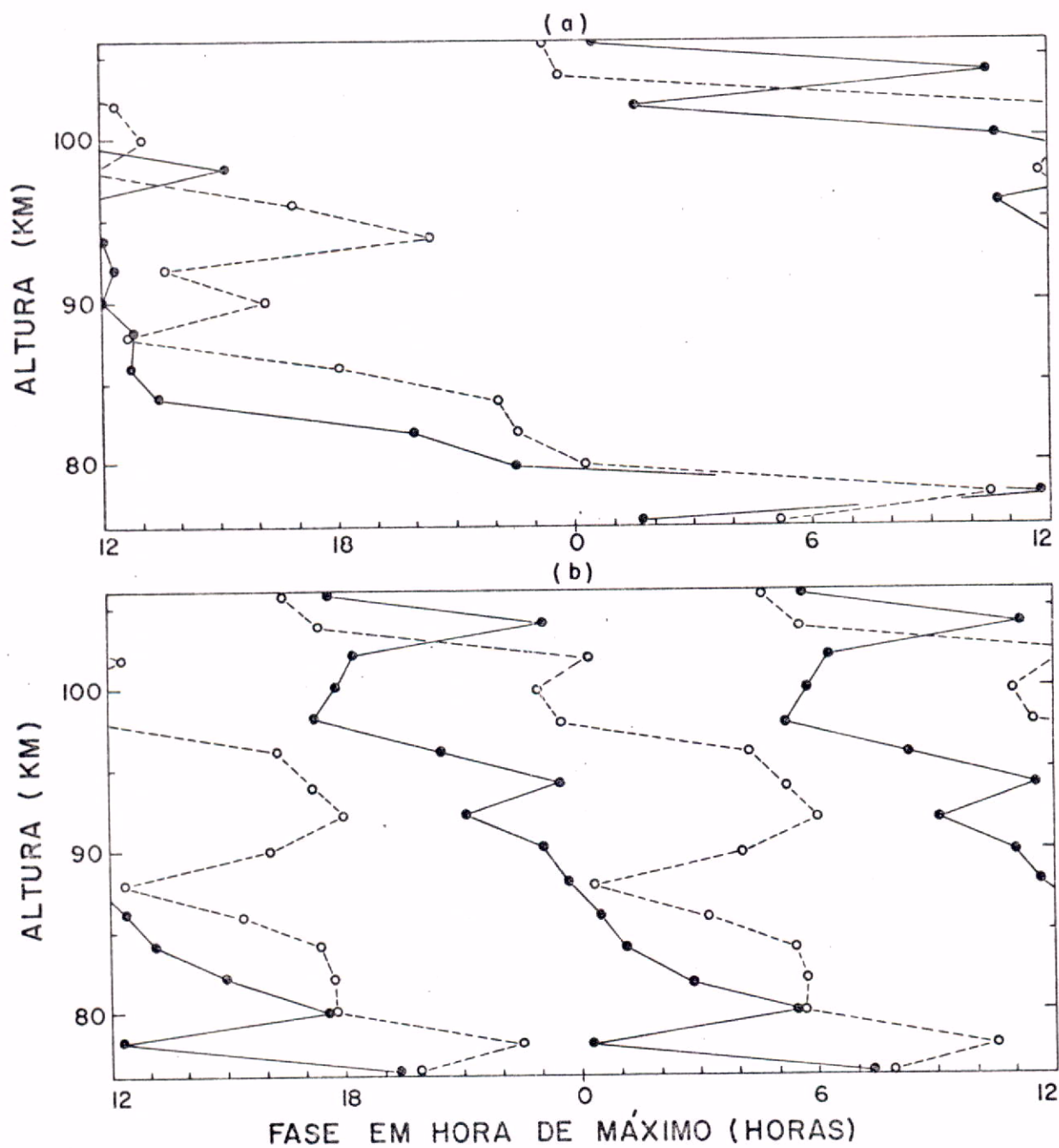


Fig. 3 - Fase das componentes de 24 h (a) e 12 h (b). •—• 21-22.06.76, o---o 22-23.06.76.

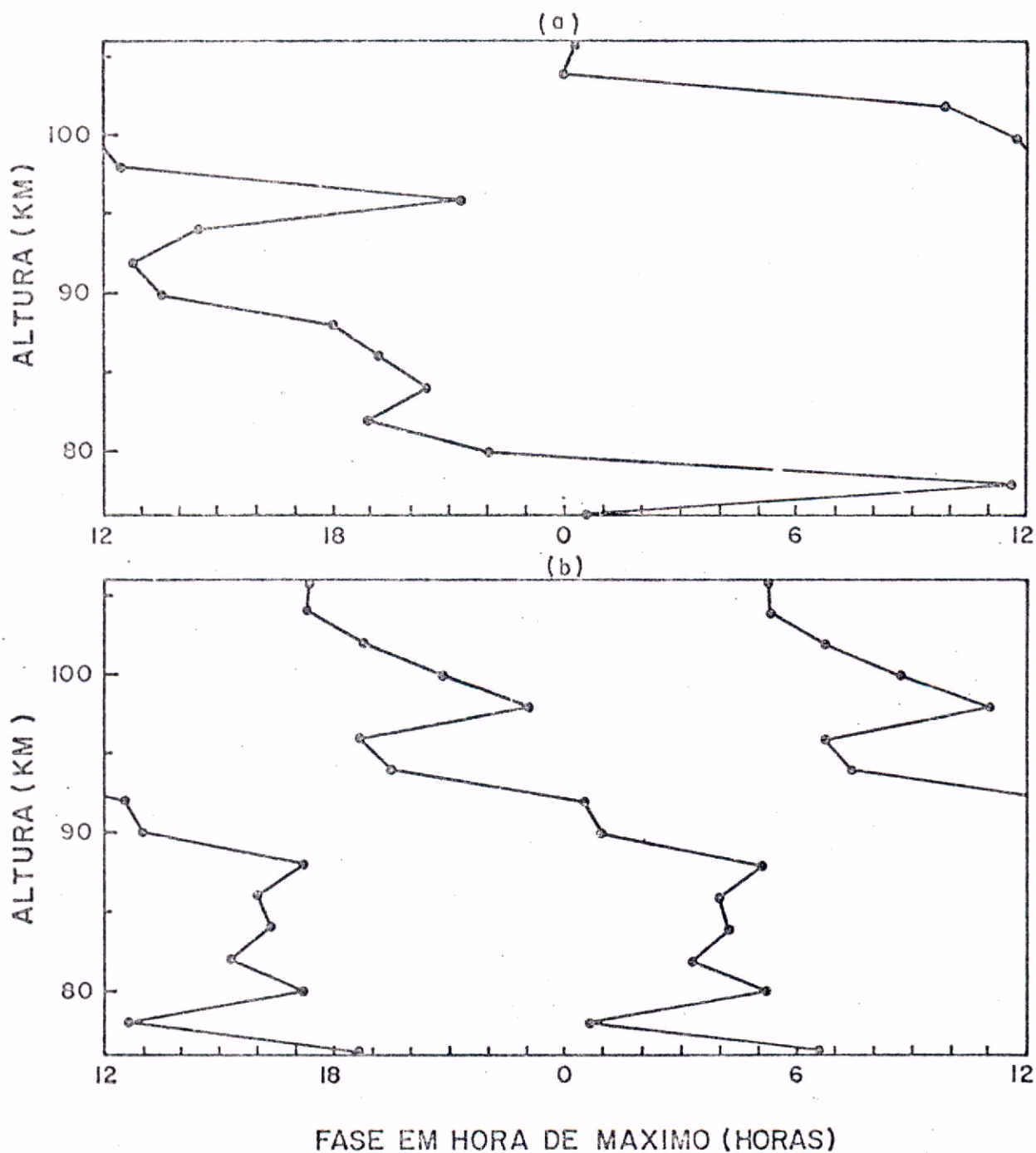


Fig. 4 - Fase das componentes de 24 h (a) e 12 h (b). Ajuste sobre quatro dias consecutivos 21 a 24.06.76.

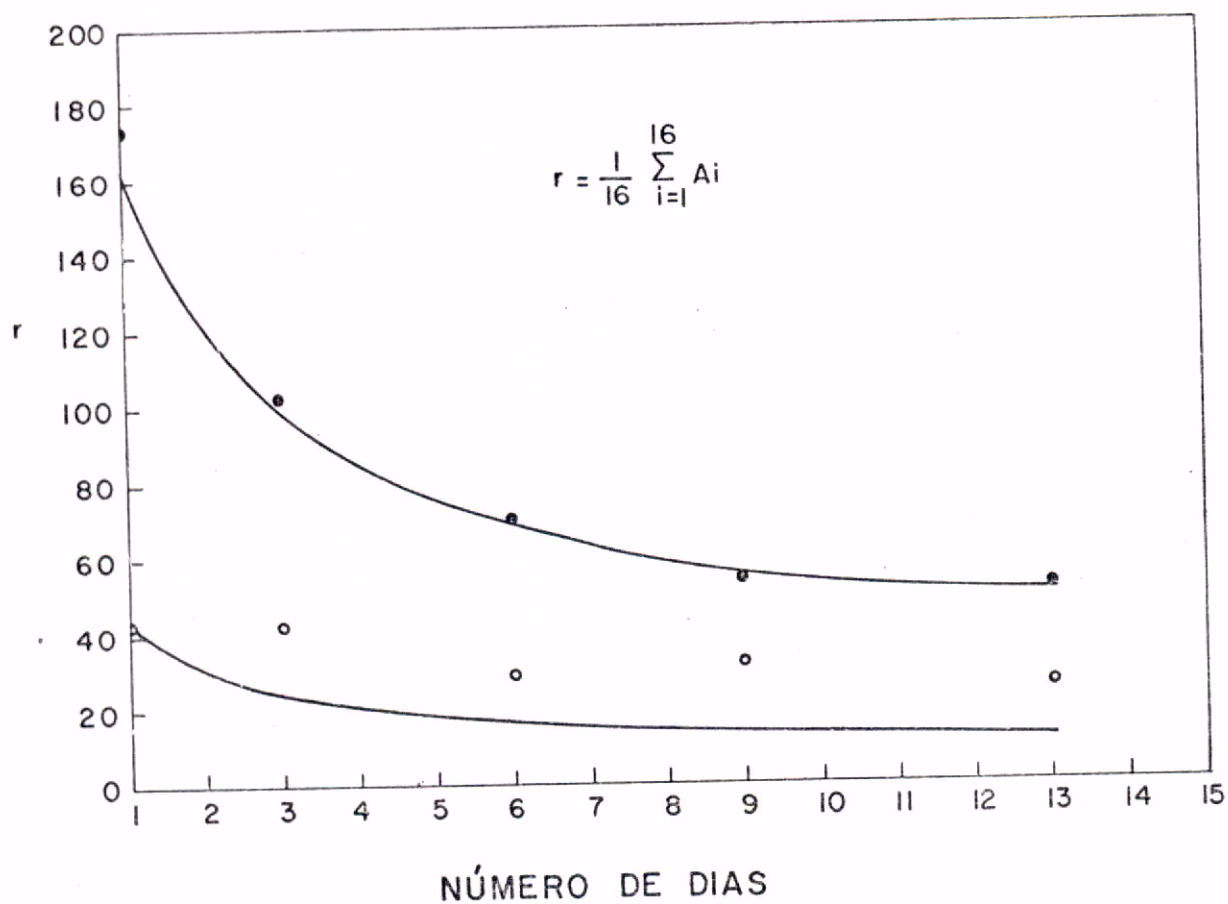


Fig. 5 - Amplitude média determinada em função do número de dias usados no ajuste. Curva contínua proporcional a $1/\sqrt{N}$. (•) ajuste diurno. (o) ajuste semidiurno.

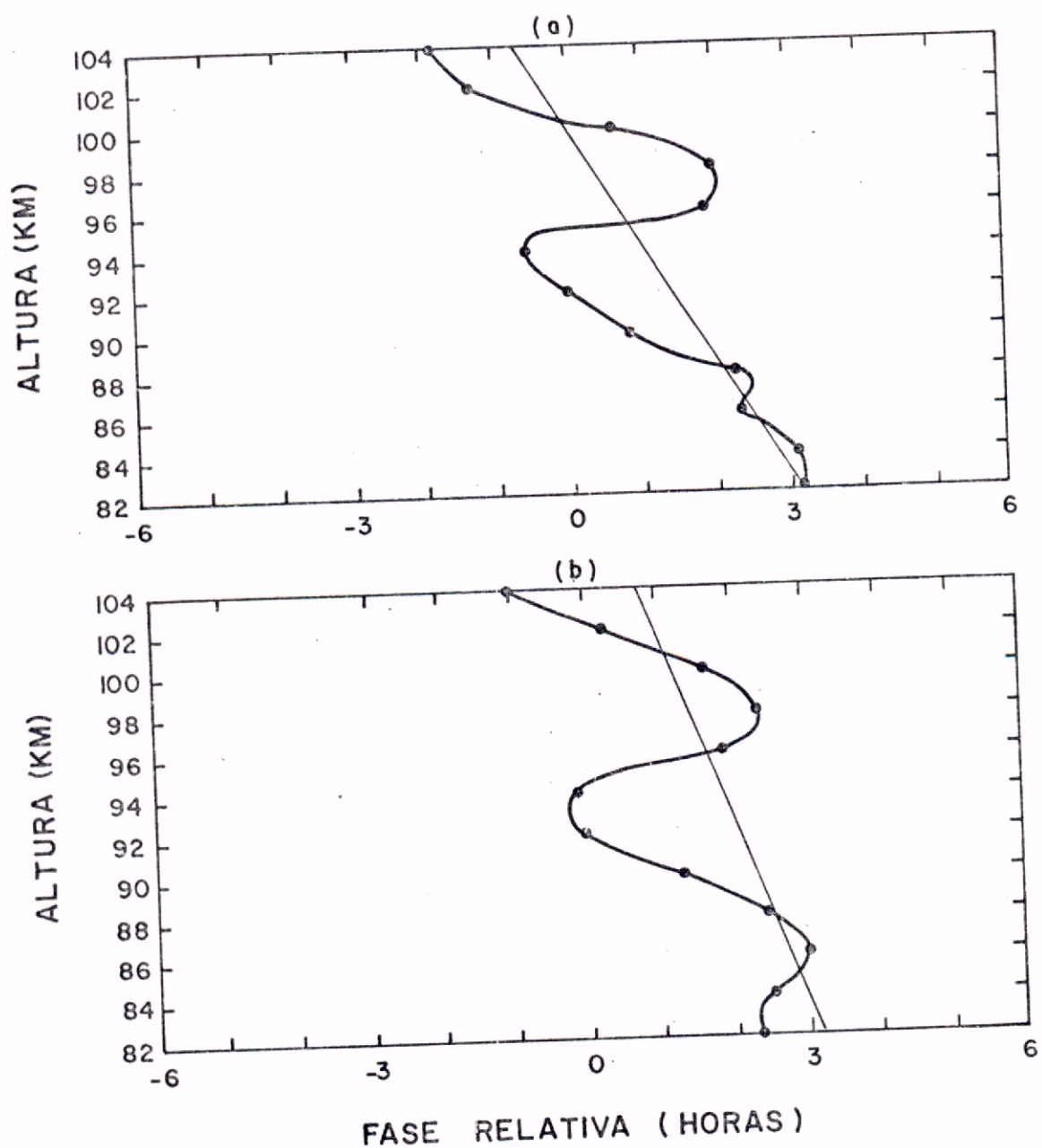


Fig. 6 - Fase da componente de 12 h da função de correlação entre 92 Km e outras alturas. (a) Sequência de 22 de julho a 3 de agosto de 1976. (b) Sequência de 21 a 27 de junho de 1976.

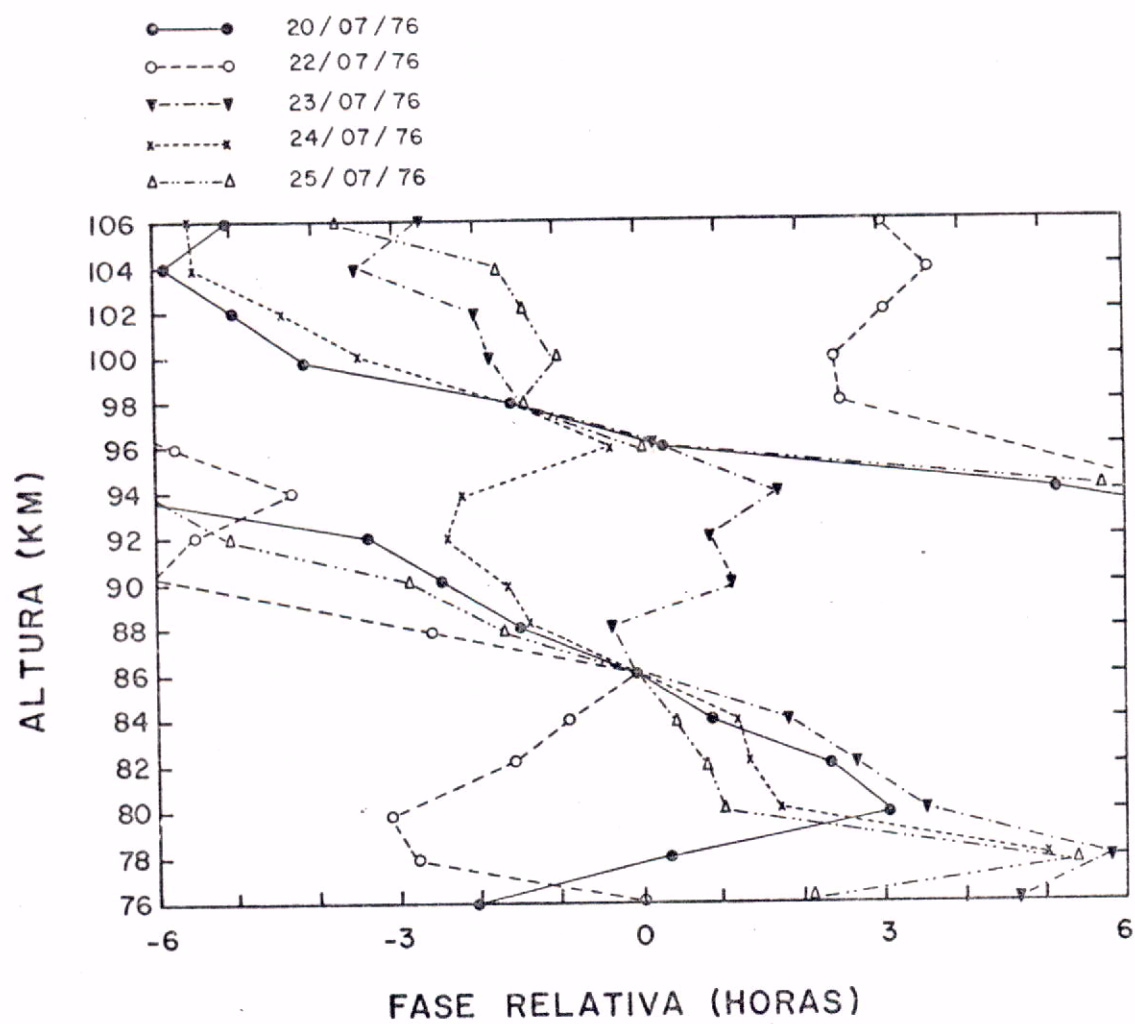


Fig. 7 - Fase da componente de 12 h da função de correlação entre 86 Km e outras alturas para cinco dias escolhidos. Veja o texto para detalhes.