l.Classificação INPE-COM.10/PE C.D.U.: 550.3A		2.Período junho de 1976	4.Critério de Distri- buição:
3.Palavras Chave (selecionadas pelo autor) MARÉS ATMOSFÉRICAS, SÓDIO ATMOSFÉRICO, RADAR DE LASER			interna 🗌 externa 🛛
5.Relatório nº <i>INPE-896-PE/021</i>	6.Data 11 de junho de 1976		7.Revisado por - B. R. (Clemesha
8.Titulo e Sub-Titulo OBSERVAÇÕES DE MARÉS ATMOSFÉRICAS NA MESOSFERA PELA TÉCNICA DO RADAR DE LASER			9.Autorizado por - Marada Nelson de Jesus Parada Diretor
10.Setor CEA/SGO Código 412			11.N9 de copias - :11
D. M. Simonich			14.Nº de páginas-25
13.Assinatura Responsáve	Laula	Redailetats	is.rreço

16.Sumário/Notas

A técnica do radar de laser é usada para medir a densidade de sódio mesosférico sobre São José dos Campos,S.P. $(23^{\circ}12'S, 45^{\circ}51'W)$. Mudanças na estrutura da camada, no decorrer do tempo, mostram a presença de oscilações de comprimento de onda vertical > 20 km e período provável de 24 horas. Cálculos teóricos, do que é esperado nessa região pela maré atmosférica solar, são apresentados. É mostrado que as estruturas oscil<u>a</u> tórias são consistentes com as previsões da maré atmosférica solar diu<u>r</u> na, dominada pelo modo $(\underline{H})_{1}^{\omega,1}$ de comprimento de onda vertical > 20 km.

17.0bservações A ser apresentado na 28a. Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, a ser realizada em Brasilia, D.F., de 7 a 14 de julho de 1976.

OBSERVAÇÕES DE MARÉS ATMOSFÉRICAS NA MESOSFERA PELA TÉCNICA DO RADAR DE LASER

por

P. P. Batista, B. R. Clemesha e D. M. Simonich Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq São José dos Campos - SP - Brasil

RESUMO

A técnica do radar de laser é usada para medir a densid<u>a</u> de de sódio mesosférico sobre São José dos Campos, S.P. (23⁰ 12' S, 45° 51' W). Mudanças na estrutura da camada, no decorrer do tempo, mo<u>s</u> tram a presença de oscilações de comprimento de onda vertical > 20 km e periodo provável de 24 horas. Cálculos teóricos, do que é esperado ne<u>s</u> sa região pela maré atmosférica solar, são apresentados. É mostrado que as estruturas oscilatórias são consistentes com as previsões da maré a<u>t</u> mosférica solar diurna, dominada pelo modo $(\underline{H})^{\omega,1}$ de comprimento de o<u>n</u> da vertical > 20 km.

ABSTRACT

The Laser radar technique has been used to measure mesospheric sodium density over São José dos Campos, S.P. $(23^{\circ}\ 12'\ S,$ $45^{\circ}\ 51'\ W)$. Changes with time in the sodium layer structure shows the presence of oscillations with vertical wavelenghts > 20 km and a probable period of 24 hours. Theoretical calculations have been carried out to predict the solar thermal tide in this region. It is shown that the oscillating structures are consistent with the predictions for the solar diurnal atmospheric tide, which is dominated by the $(H)_{1}^{\omega,1}$ tidal mode with vertical wavelength > 20 km.

1 - INTRODUÇÃO

Medidas da densidade de átomos de sódio presentes na m<u>e</u> sosfera, tomadas por um período suficientemente longo, usando-se um r<u>a</u> dar de Laser instalado em São José dos Campos, S.P. (23⁰41'S, 45⁰51'W), mostram estruturas periódicas na altura e no tempo, que podem ser inte<u>r</u> pretadas como sendo parcialmente produzidas por marés atmosféricas sol<u>a</u> res.

Para este trabalho, dados tomados durante 1974 e 1975 f<u>o</u> ram analisados de tal maneira que mostrem as oscilações.Comparações de<u>s</u> sas oscilações com a maré atmosférica solar,prevista teoricamente, mo<u>s</u> tram alguma concordância.

2 - OBSERVAÇÕES DA CAMADA DE SÓDIO

2.1 - METODO E ANÁLISE DOS DADOS

A técnica do radar de Laser consiste em enviar pulsos de luz Laser para a atmosfera e receber, por meio de um sistema apropriado de contagem de fotons, a luz retro-espalhada; esta quantidade de luz que chega de um determinado intervalo de altura é proporcional à dens<u>i</u> dade de partículas espalhadoras existentes naquela região. Esta técnica foi desenvolvida, nos anos 60, por vários pesquisadores (Fiocco e Grams, 1964; Bain e Sandford, 1966; Clemesha, et al., 1966). O método pode fornecer, entre outras coisas: medidas da densidade atmosférica, pelo es palhamento Rayleigh; concentração de aerosoís, pelo espalhamento Mie; e concentração de constituintes menores da atmosfera, pelo espalhamento res sonante. A seção transversal de espalhamento ressonante é muito maior que a seção transversal de espalhamento Rayleigh (cerca de 10¹⁴ ou 10¹⁵ vezes); por isso, densidades de átomos, cujas concentrações são muito p<u>e</u> quenas, podem ser medidas.

No nosso caso, um Laser de corantes sintonizāvel, ajust<u>a</u> do na linha D_2 do sódio (5890 Å), é usado para fornecer a densidade dos átomos de sódio livres na camada existente na mesosfera. As caracterís ticas do Laser de corantes do INPE e sua aplicação em estudos atmosf<u>é</u> ricos são dadas por Kirchhoff (1972). Nossos dados se referem somente ao período noturno. Perfis de densidade são tomados, geralmente, de 10 em 10 minutos e a resolução em altura é de 2 km.

Os dados de saída do radar de Laser são contagens de f<u>ó</u> tons para cada intervalo de altura. Para cada disparo do Laser, as co<u>n</u> tagens são armazenadas acumulativamente nos canais de um analisador mu<u>l</u> ti-canal, e,apos um certo número de disparos, suficiente para dar uma boa estatística, a soma dessas contagens em cada canal é utilizada para fornecer perfis de densidade atmosférica até 40 quilômetros de altura e

- 3 -

densidade de átomos de sódio mesosférico. Atualmente, os dados são pr<u>o</u> cessados em tempo real, por meio de uma calculadora programável acopl<u>a</u> da ao sistema de saída do radar de Laser. O funcionamento desse sist<u>e</u> ma é relatado por Clemesha e Simonich (1975). O método de redução para a obtenção da densidade de átomos de sódio é dado em Simonich e Clemesha (1976).

A abundância total de atomos de sodio na camada pode va riar por dois motivos:

 Aparentemente, devido as variações de energia do Laser e da transmissão da atmosfera, que alteram, assim, a quantidade de fotons que chegam.

2) Realmente, devido a efeitos químicos e de transporte, que al teram a quantidade de sódio livre na camada.

Estas variações são indesejáveis para o nosso propósito, que é o de estudar perturbações de marés na atmosfera. Por isso, os d<u>a</u> dos são normalizados pela abundância total, o que equivale a forçar a condição de que a quantidade total de sódio numa coluna não varia. Esta normalização não deve alterar as variações de densidade com comprime<u>n</u> tos de onda vertical menores que a largura da camada.

Como o sódio mesosférico está sendo utilizado, neste tr<u>a</u> balho, apenas como um traçador das variações de densidade atmosférica, então, nosso proximo passo e isolar o efeito do sódio. Isto e feito,sub traindo-se, de cada perfil individual, um perfil suave que se ajusta a média de toda a noite; com isso, ficamos apenas com as perturbações da densidade em torno da média.

Neste estudo estamos supondo que:

$$\frac{\Delta \rho_{A}}{\rho_{A}} \alpha \frac{\Delta \rho_{s}}{\rho_{s}}$$
(1)

onde

 $\Delta \rho_A = \text{perturbações na densidade atmosférica}$ $\rho_A = \text{densidade atmosférica}$ $\Delta \rho_s = \text{perturbação na densidade de sódio}$ $\rho_s = \text{densidade de sódio}$

Até aqui obtivemos $\Delta \rho_s$, que, então, deve ser dividido por ρ_s . Na prática, no entanto, nos o dividimos pelo desvio padrão das varia ções no tempo, para cada altura. Isto porque a razão $\Delta \rho_s / \rho_s$ pode tornar -se muito grande pois, devido ãs flutuações estatísticas nos dados, ρ_s pode tornar-se zero em alguns pontos nas extremidades da camada. Como o desvio padrão tem uma variação, com a altura, semelhante ã densidade, <u>e</u> le é usado. Isto também faz com que as variações da amplitude fiquem da mesma ordem de grandeza em todas as alturas.

Como estamos estudando variações de densidade de periodos longos (semidiurno e diurno), apenas dados tomados por longo tempo são de interesse. Os mais convenientes, portanto, seriam dados tomados duran te toda a noite, porém várias limitações práticas existem. Analisamos, então, dados tomados por mais de quatro horas e meia. Os dados são tam bém suavisados no tempo, fazendo-se uma média ponderada entre cinco pon tos consecutivos, para tirar as variações locais de curto período.

Os dados são apresentados de tal maneira que tornem as variações visualizáveis. Isto é feito representando-se as variações, na altura e no tempo, em termos de níveis de intensidade. As variações são inicialmente normalizadas para valores entre 0 e 5, e divididas em 5 níveis igualmente espaçados.

2.2 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Alguns dos resultados obtidos da maneira acima são mos trados nas próximas figuras. Na Figura 1, cerca de 9 horas de medidas na noite de 5-6/2/74 são apresentadas. Notemos a nítida característica de propagação existente na figura. Um pico de máximo aparece em cerca de 98 km ãs 20:30 hs e se propaga para cerca de 84 km por volta de 5:00 hs. Outros máximos aparecem também na esquerda inferior e na direita sup<u>e</u> rior da figura. Notemos que, para cada tempo, aparecem dois máximos e um mínimo ou vice-versa, indicando a existência de um comprimento de onda vertical > 20 km. Na Figura 2, a característica de propagação e também evidente, porém comprimentos de onda verticais menores também aparecem. Nas Figuras 3 e 4 são mostrados outros gráficos, onde também é evidente a presença de um comprimento de onda vertical > 20 km.

- 6 -

3 - INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

3.1 - MARÉS ATMOSFÉRICAS: RESUMO TEÓRICO

A teoria clássica das marés atmosféricas é uma teoria al tamente idealizada, onde é feito grande número de aproximações, a fim de tornar o problema matemáticamente tratável. As perturbações de marés (na pressão, temperatura, densidade, etc) são admitidas como perturba ções linearizáveis sobre um estado básico; a terra é suposta esférica e a atmosfera um gás ideal; e como estado básico, considera-se o repouso. A absorção da radiação solar pelo vapor d'água na troposfera e pelo oz<u>ô</u> nio na estratosfera mostra-se ser o mais importante mecanismo de excit<u>a</u> ção das marés atmosféricas. Completa descrição dos estudos experimentais das referidas marés e da teoria clássica é dada em Chapman e Lindzen (1970).

A teoria prevê que as oscilações de marés são constituí das de diversos períodos, tendo uma rica estrutura latitudinal e verti cal, que se constitui em diversos modos de oscilação. As oscilações diur nas e semidiurnas têm a mesma ordem de magnitude na mesosfera e na baixa termosfera. O principal modo teórico de oscilação semidiurno é o denomi nado $(\mathbb{H}_2^{2\omega,2}, \text{ cuja principal característica é a fase constante nesta re$ gião de altura. Em torno de 100 km e acima, outros modos mais altos $<math>(\mathbb{H}_4^{2\omega,2}, \mathbb{H}_6^{2\omega,2})$ também são de importância. Para a maré diurna não hã uma grande dominância de um sõ modo. Dois conjuntos de soluções existem para a maré diurna: o primeiro conjunto é constituído por on das que se propagam verticalmente com pequenos comprimentos de onda e o segundo por oscilações que estão restritas ãs regiões de excitação, não podendo propagar energia para longe da fonte. O segundo conjunto não tem grande importância em nossa latitude. No primeiro conjunto os principais modos são denominados $(H_1^{\omega})^1$, $(H_3^{\omega})^1$ e $(H_5^{\omega})^1$ e são ondas que se prop<u>a</u> gam, verticalmente, com comprimentos de onda médios de 25 km, 12 km e 6 km. Suas importâncias relativas, bem como amplitudes e fases, são ba<u>s</u> tante variáveis e dependem muito da estrutura de temperatura na tropo<u>s</u> fera, e dos detalhes da função de excitação por toda a terra.

3.2 - RESULTADOS TEÓRICOS

Calculamos as variações previstas na densidade atmosféri ca em 23^OS, de 74 km a 106 km de altura, devidas às marés diurna e semi diurna, considerando a excitação térmica devida à absorção da energia so lar pelo ozônio e pelo vapor d'água na atmosfera. Estes cálculos foram feitos seguindo-se a sequência dada em Chapman e Lindzen (1970), e o mé todo utilizado para achar a estrutura vertical das oscilações é aquele dado em Lindzen e Kuo (1969). Na Figura 5 é mostrada a variação espera da na densidade atmosférica, devida à maré semidiurna. A linha pontilha da refere-se às variações devidas somente à excitação pelo vapor d'água e a tracejada às variações devidas à excitação pelo ozônio. A linha cheia refere-se às duas contribuições em conjunto. Nota-se que a fa se da oscilação semidiurna é quase constante com a altura, devido à domi nância do modo $(\mathbb{H}_2^{2\omega,2}$. Notemos,também, que o ozônio é mais efetivo para excitar a maré semidiurna solar na mesosfera, que o vapor d'água. Na F<u>i</u> gura 6, gráfico semelhante é mostrado, para a maré diurna. Nítida cara<u>c</u> terística de propagação de fase existe nesse caso. Notemos que as ondas excitadas pelo ozônio e pelo vapor d'água estão quase em antifase, nessa região de altura. Na Figura 7, são mostradas as respostas em cada modo separadamente. Vemos que a maior importância é do modo $(H)_1^{\omega,1}$ de compr<u>i</u> mento de onda vertical > 20 km. As contribuições dos modos $(H)_5^{\omega,1} \in H)_3^{\omega,1}$ seguem-se em importância.

3.3 - COMPARAÇÕES

Como foi visto no item 2.1, na analise dos dados, dividi mos a densidade de sódio pela abundância total e pelo desvio padrão, o que torna as variações na altura e no tempo da mesma ordem de grandeza. Em consequência, uma oscilação, como a semidiurna, com fase quase cons tante com a altura, irá desaparecer. Já a maré diurna é constituída de diversos modos, com comprimentos de onda verticais menores que o inter valo dos dados, sendo assim pouco influenciada pela análise. A fim de facilitar as comparações, foram feitos gráficos das variações esperadas na densidade atmosférica em termos de níveis de intensidade, semelhantes aos graficos experimentais. Nesses graficos, as variações de 24 horas fo ram subtraídas de sua média no período amostrado, tal como nos dados ex perimentais. Na Figura 8 e mostrada a variação esperada da densidade at mosférica devida à maré diurna. O efeito de subtrairmos a variação de 24 horas de sua média, nas doze horas amostradas, é o de diminuir o perío do aparente, isto e, os maximos e os minimos parecem cair mais rapidamen

te com a altura, e diminuir a amplitude das variações no centro do inter valo considerado, e aumenta-las no início e no fim. Na Figura 9 é mos trada uma estrutura semelhante, porém, considerando-se apenas o modo $(H)_1^{\omega,1}$, Notemos que as Figuras 8 e 9 mantêm a mesma linha geral, sendo que a presença dos modos $(H)_3^{\omega,1}$ e $(H)_5^{\omega,1}$, na Figura 8, introduz algumas v<u>a</u> riações de menor comprimento de onda. Como $(\widehat{H})_1^{\omega,1}$ é responsável pela for ma geral das variações, usaremos apenas esse modo para as próximas figuras. Na Figura 10, a variação de 24 horas é subtraída da média no perío do mostrado. Notemos a grande semelhança dessa figura com a Figura 4. A presença de estruturas oscilatórias com comprimentos de onda verticais > 20 km ē tambēm evidente em outros dados experimentais não apresenta dos aqui. Uma característica que se apresenta na maioria dos dados expe rimentais é a grande variabilidade de fase das oscilações. Isto pode ser visto comparando-se as posições dos máximos e mínimos nas Figuras 1, 3 e. 4. Medidas experimentais da mare atmosferica em outros locais, porém na mesma região de altura (Fellows et al., 1974; Kent et al., 1972; Spizzichino, 1969), mostram também grande variabilidade de fase do modo $(H)_1^{\omega,1}$. Interpretações dessa variabilidade de fase têm sido dadas em te<u>r</u> mos da importância relativa com que chegam na mesosfera as ondas excita das pelo vapor d'água e pelo ozônio (Scholefield e Alleyne, 1975). Como ē visto na Figura 6,essas duas ondas chegam quase em antifase na mesos fera. As variações, que ocorrem dia a dia no conteudo de vapor d'agua na troposfera, podem assim alterar grandemente a fase das oscilações na me sosfera. Na Figura 11 é mostrada a variação esperada na densidade atmos férica devida à maré diurna, considerando-se a excitação apenas pelo 0Z0 nio. A variação em 24 horas é subtraída da média no período mostrado.No

temos a grande semelhança entre essa figura e a Figura 1, o que sugere que,nesse dia em particular, o ozônio foi mais efetivo para excitar a maré diurna na mesosfera, que o vapor d'água.

4 - CONCLUSÕES

As variações da densidade de átomos de sódio mesosférico em torno da média são atribuídas principalmente as variações da densid<u>a</u> de atmosférica, produzidas por marés. Comparações dos dados experime<u>n</u> tais com as variações previstas, devidas as marés diurna e semidiurna, mostram que as oscilações com características da maré semidiurna desap<u>a</u> recem na análise dos dados. Já a maré diurna, que é constituída por o<u>n</u> das que se propagam com comprimentos de onda médios de 25 km, 12 km e 6 km, portanto, menores que o intervalo dos dados, não deve ser grand<u>e</u> mente alterada pelo processo de análise.

O modo $(\mathbb{H}_{1}^{\omega,1})$ com comprimento de onda médio de 25 km é previsto ser a dominante nessa altura e latitude. Este modo é visto es tar presente na maioria dos dados. Existe também em alguns dos dados a presença de comprimentos de onda menores, o que corresponde à presença de modos mais altos. A variabilidade de fase não é prevista pela teoria clássica, porém isto concorda com outras medidas experimentais da maré diurna na mesosfera.

Kent e Keenliside (1975), medindo diretamente variações da densidade atmosférica em torno da média, com um radar de Laser em Kingston, Jamaica (18⁰N, 77⁰W), acharam oscilações periódicas semelhan tes, porém commenores comprimentos de onda, que correspondem ao modo $(\mathbb{H})_{3}^{\omega,1}$. A estrutura latitudinal da maré diurna prevê justamente a dominância do modo $(\mathbb{H})_{3}^{\omega,1}$ para 18⁰N, assim como a dominância de $(\mathbb{H})_{1}^{\omega,1}$ para 23⁰S, havendo, portanto, para duas diferentes latitudes, semelhante concor dância com a teoria.

Em conclusão, podemos afirmar que a concordância é boa, levando-se em consideração que grandes limitações e aproximações exis tem, tanto na teoria, quando nos dados experimentais.

- BAIN, C. W. and SANDFORD, M. C. W. "Light scatter from a laser beam at heights above 40 km". J. Atmos. Terr. Phys., 28: 543, 1966.
- CHAPMAN, S. and LINDZEN, R. S. Atmospheric Tides. Dordrecht, D. Reidel; New York, Gordon and Breach/Science Publ., 1970.
- CLEMESHA, B. R.; KENT, G. S. and WRIGHT, R. W. H. "Laser probing the lower atmosphere" . *Nature*, 209: 184, 1966.
- CLEMESHA, B. R. and SIMONICH, D. M. A calculator based data acquisition system for a laser radar. São José dos Campos, INPE, nov. 1975. (INPE-782-PE/001).
- FELLOWS, J.L.; SPIZZICHINO, A.; GLASS, M. and MASSEBEUF, M. "Vertical propagation of tides at meteor heights". J. Atmos. Terr. Phys., <u>36</u>: 385-396, 1974.
- FIOCCO, G. and GRAMS, G. "Observation of the Aerosol layer at 20 km by optical radar". J. Atmos. Sci., 21: 323, 1964.
- KENT, G. S.; KEENLISIDE, W.; SANDFORD, M.C.W. and WRIGHT, R.W.H. -"Laser radar observations of atmospheric tides in the 70-100 km height region". J. Atmos. Terr. Phys., 34: 373-386, 1972.
- KENT, G. S. and KEENLISIDE, W. "Laser radar observations of the $(\mathbb{H}_{3}^{\omega,1})$ diurnal atmospheric tidal mode above Kingston, Jamaica". J. Atmos. Sci., 32: 1663-1666, 1975.
- KIRCHHOFF, V.W.J.H. "Laser, características e aplicação para o estudo do sodio atmosférico". ITA Engenharia, <u>3</u> (1): 14-18, jul.,1972.
- LINDZEN, R. S. and KUO, H. L. "A realiable method for the numerical integration of a large class of ordinary and partial diferential equations". *Mon. Wea. Rev.*, <u>97</u>: 732-734, 1969.

SCHOLEFIELD, A. J. and ALLEYNE, H. - "Low latitude meteor wind observations". J. Atmos. Terr. Phys., 37: 278-236, 1975.

- SIMONICH, D. M. and CLEMESHA, B. R. Accurate calibration of lidar returns for atmospheric sodium measurements. São José dos Campos, INPE, jan. 1976. (INPE-804-PE/013).
- SPIZZICHINO, A. "Étude experimentale des vents dans la haute atmosphere (premiere partie)". Ann. Geophys, <u>25</u> (3): 5-28, 1969.



Fig. 1 - Variação da densidade atmosférica. 05-06 de fevereiro de 1974.



Fig. 2 - Variação da densidade atmosférica. 28-29 de maio de 1975.

- 16 -



Fig. 3 - Variação da densidade atmosférica. 24-25 de julho de 1975.



- 18 -



Fig. 5 - Amplitude e fases da variação semidiurna da densidade.

----- Excitação do 0_3 e H_20 ; ----- Excitação do 0_3

... Excitação do vapor d'água.







Fig. 6 - Amplitude e fases da variação da densidade atmosférica devidas à maré diurna. Apenas os modos com h_n positivos.

---- Excitação do 0_3 e H₂O; ---- Excitação do 0_3 ; Excitação do vapor d'água.





solar diurna. Variação subtraída da média em 12 horas.



- 23. -

12 horas.





- 25 -