

## Perfis da Luminescência Noturna a Partir de Medidas de Radar de Espalhamento Incoerentes e Fotômetros

J. H. A. SOBRAL

*Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), São José dos Campos, SP*

Recebido em 22 de Julho de 1977

An incoherent scatter radar plus a 6300 Å photometer compose together an excellent equipment to predict dissociative recombination  $O(1S)$  emission rate profiles. Another option for measuring emission rate profiles is rocket technique. However, rocket experiments are so far quite costly and their results applicable only to instantaneous time scales. Experiment utilizing incoherent scatter radar and 6300 Å photometer were performed at Arecibo, Puerto Rico (geographic coordinator 18,350 $^{\circ}$ N, 66,750 $^{\circ}$ W). Such measurements allowed simulation of nighttime  $O(1S)$  emission rate profiles and gave rise to remarkable aspects of emission rate dynamics.

O radar de espalhamento incoerente e o fotmetro medindo a linha vermelha (6300Å) do oxigênio formam um excelente par para a determinação do perfil de luminescência 6300 Å. A outra opção para a medida de tal perfil seria de medidas "in loco" através de foguetes. Entretanto estas experiências são raramente feitas devido ao seu alto custo e sua amostragem só se aplica a um certo instante. Experiências com radar de espalhamento incoerente e fotômetro na linha 6300 Å foram realizadas em Arecibo, Porto Rico. Tais medidas possibilitaram efetuar uma simulação do comportamento dos perfis de emissão de  $O(1S)$  durante a noite. Os resultados, de ótima confiabilidade, mostram interessante aspectos da dinâmica de emissão.

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo da dinâmica da ionosfera intensificou-se consideravelmente com experiências de radares de espalhamento incoerente<sup>1</sup>. Em latitudes médias, podemos citar alguns trabalhos de importância, a título de ilustração. Carlson<sup>2</sup> detetou o aumento de temperatura dos eletrons antes do amanhecer, devido ao fluxo de eletrons oriundos do ponto magnético conjugado. Thome<sup>3</sup> detetou ondas de gravidade originadas na região polar, que se propagavam em direção ao equador. Deduziram-se frequências de colisão ion-molécula neutra<sup>4</sup> e analisou-se o balanço termodinâmico da ionosfera noturna<sup>5</sup>. Em relação às variações impostas pela componente neutra, foram realizadas medidas de temperatura da atmosfera neutra<sup>6,7</sup>, ventos<sup>8,9</sup> e de ondas de gravidade na região E<sup>10</sup>.

Paralelamente, experiências com luminescência, no comprimento de onda de 6300 Å (daqui em diante referenciado simplesmente por L6300), têm trazido consideráveis progressos ao estudo da ionosfera. Tal radiação provém do átomo excitado de oxigênio O(<sup>1D</sup>), que se origina da reação de recombinação dissociativa do ion oxigênio molecular. A intensidade desta linha é tanto maior quanto mais baixa estiver a ionosfera (devido ao aumento de O<sub>2</sub> com o decréscimo de altura). Desse modo, através de L6300, toma-se conhecimento das descidas e subidas da ionosfera. Se tais dados forem obtidos em varredura de elevação e de azimute, pode-se inferir, com certa aproximação, as respectivas causas. Por exemplo, deslocamentos verticais do plasma ionosférico, de origem elétrica, ( $\underline{E} \times \underline{B}$  drifts) podem ocorrer quase que simultaneamente numa faixa de latitudes de muitos graus, ao passo que ondas de gravidade e ventos propagam-se com velocidades características, devido ao sistema inercial da atmosfera, resultando em perturbações ionosféricas com velocidade de fase também características.

Barbier<sup>11</sup> verificou o movimento no plano meridional de uma frente de intensidade elevada de 6300 Å relacionada com o movimento do plasma ionosférico. Peterson *et al*<sup>12</sup> fizeram estudos teóricos sobre a geração de L6300. O arco vermelho intertropical foi associado à anomalia equatorial<sup>13</sup>, seus movimentos medidos<sup>14,15</sup>, e discutidas suas variações longitudinais<sup>16</sup>, Bittencourt *et al*<sup>17</sup> associaram variações de L6300 com ventos termosféricos.

O presente trabalho discute observações simultâneas de L6300 e de perfis de densidades eletrônica obtidos por meio de radar de espalhamento incoerente, em Arecibo, (coordenadas geográficas  $18,35^{\circ}\text{N}$  e  $66,75^{\circ}\text{W}$ ). São calculados perfis de emissão de L6300 na região F, no período noturno, onde tais perfis, fornecidos pelo radar, serviram de dados de entrada para o cálculo dos perfis de L6300. O modelo de atmosfera utilizado foi o de Jacchia<sup>18</sup> e sua escolha foi feita de modo que o cálculo, verticalmente integrado, coincidissem com a intensidade observada pelo fotômetro no solo. Foram também obtidos perfis de luminescência no comprimento de onda de  $5577 \text{ \AA}$  a partir dos perfis de L6300 sem levar em conta a atenuação dos átomos  $\text{O}(^1\text{D})$  por colisões com o nitrogênio molecular. Além disso, são indicadas interpretações para os resultados obtidos.

Medidas simultâneas de L6300 e de densidade eletrônica, obtida por radar de espalhamento incoerente, foram feitas anteriormente em Arecibo e comprovaram que a totalidade de L6300 do céu noturno (a menos dos componentes d-c de L6300) deve-se à recombinação dissociativa<sup>19</sup> e permitiram o estudo da variação de certos constituintes neutros da atmosfera superior<sup>20</sup>. Porém, esses trabalhos diferem do nosso porque consideram basicamente o comportamento da intensidade integrada de luminescência durante a noite, ao passo que aqui consideramos especificamente o comportamento dos perfis de luminescência também durante a noite.

Os dados de L6300 foram obtidos com um filtro de interferência oscilante ("tilting" ou "rocking" filter<sup>9</sup>) em que a faixa de comprimentos de onda filtrada, é função da inclinação do raio incidente. Tal propriedade, de deixar passar comprimentos de onda de acordo com a inclinação do filtro, visa eliminar a componente de ruído proveniente das estrelas, da lua e da outra eventual contaminação, desde que esta ocorra numa escala de tempo superior ao período de oscilação do filtro.

Os dados de fotômetro foram obtidos com a linha de visada do fotômetro na vertical.

## 2. DENSIDADE ELETRÔNICA

Os dados de densidade eletrônica foram obtidos por meio do radar de espalhamento incoerente de Arecibo, Porto Rico. Uma medida de densidade eletrônica foi tomada a cada 5 Km, que corresponde ao tempo de integração do radar para a região F da ionosfera (levando em conta que o pulso do radar propaga-se à velocidade luz, tanto indo como vindo da ionosfera). A faixa total de altura das medições de densidade eletrônica foi de 165-180 Km até 600 Km. Acima desta faixa os resultados indicaram ausência total de L6300, o que nem sempre ocorreu, abaixo dela. A precisão das medidas é estimada da ordem de 5%.

## 3. O MODELO ATMOSFÉRICO

O modelo atmosférico utilizado foi o de Jacchia<sup>18</sup>. Os perfis, indexados pela temperatura exosférica, foram escolhidos segundo a atividade solar do dia. A atividade solar diária é fornecida por Virginia Lincoln Laboratory, em tabelas mensais, no Journal of Geophysical Research. A atividade solar a 2800 MHz foi o índice para a escolha da temperatura exosférica (segundo CIRA<sup>21</sup>, 1966) que por sua vez indexou o perfil de Jacchia.

A simulação por computador, a que nos referimos, consistiu na reprodução dos processos que geraram a L6300 noturna, utilizando-se, como dados iniciais, perfis de densidade eletrônica e atmosfera neutra, conforme descrito no Último parágrafo.

## 4. CÁLCULO DE L6300

A intensidade  $I$ , da L6300 foi calculada pela expressão abaixo:

$$I = 10^{-1} \int_{h_2}^{h_1} \gamma_1 R \left[ \frac{A_{6300}}{A + QN_{N_2}} \right] N_{O_2} N_e^F dh \text{ Rayleighs} \quad (1)$$

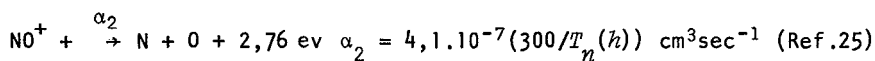
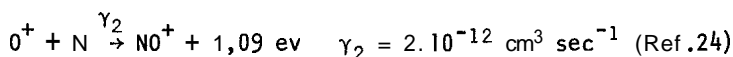
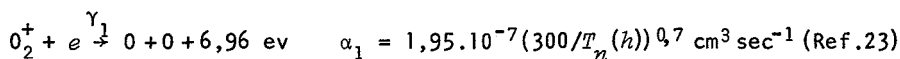
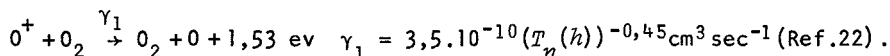
onde:

$N_x$  = concentração do elemento  $x$  em  $\text{cm}^{-3}$

$h_1, h_2$  (Km) = limites de alturas

$$F = \frac{N_0^+}{N_e} = \frac{1}{1 + \frac{N_{O_2}}{N_e} + \frac{N_{N_2}}{N_e}}$$

onde  $\alpha_1, \alpha_2, \gamma_1$  e  $\gamma_2$  são razões de produção das seguintes reações:



$T_n(h)$  = temperatura da atmosfera neutra.

R = número médio de  $D(^1D)$ 's produzidos por cada reação  $O_2^+ + e$ . Valor adotado: 0,5 (Ref.26).

$A = A_{6300} + A_{6392} + A_{6364}$ , onde  $A_z$  é o coeficiente de Einstein para a transição eletrônica que emite um foton de comprimento de onda  $i$ .

$$A_{6300} = 6.9 \times 10^{-3} \text{ seg}$$

$$A_{6392} = 1.1 \times 10^{-6} \text{ seg}$$

$$A_{6364} = 2.2 \times 10^{-3} \text{ seg}$$

## 5. RESULTADOS OBTIDOS

A Figura 1 mostra dois perfis de luminescência. Um deles (indicado na figura com "emissão atenuada") corresponde à emissão de L6300 e foi gerado pelos átomos  $O(^1D)$  que subexistiram às colisões desexcitantes com o nitrogênio molecular. O outro perfil (indicado na mes-

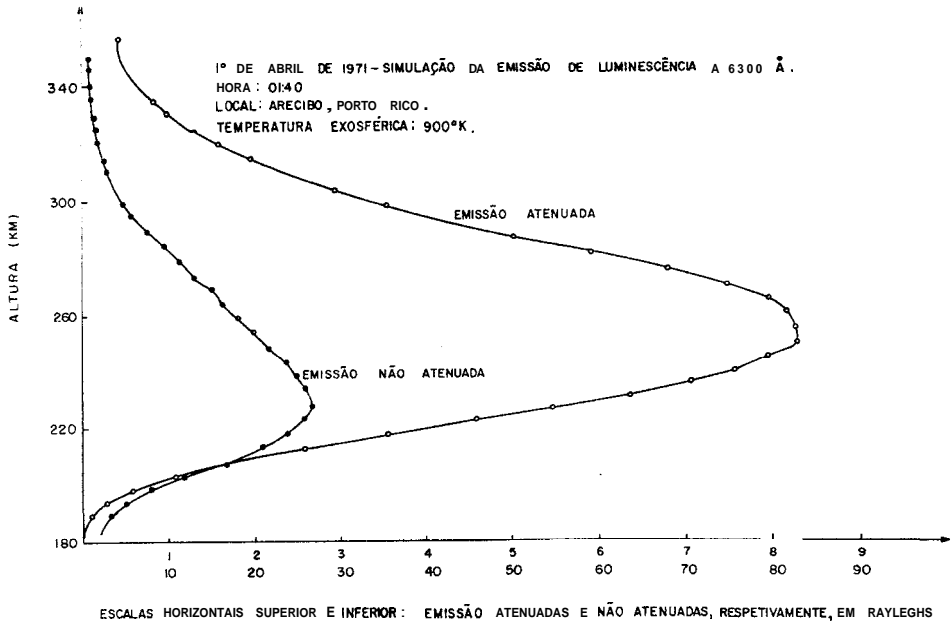


Figura 1

na figura como "emissão não atenuada"), corresponde à emissão no comprimento de onda de 5577 Å e foi gerado pelos átomos  $O(^1S)$  os quais não são desexcitados por colisões na região F devido ao curto tempo de transição fotoemissiva de 5577 Å comparado com o período de colisões entre os átomos  $O(^1D)$  e o nitrogênio molecular, característicos da região F.

Cada perfil da Figura 1 corresponde a um intervalo de tempo de cinco minutos que é o tempo requerido pelo radar de espalhamento incoerente de Arecibo para a obtenção de um perfil completo de densidade eletrônica.

Os perfis mostrados na Figura 2, de "a" a "f", são do tipo do perfil "não atenuado" da Figura 1. Multiplicando-se por oito a escala horizontal destes perfis, obtemos imediatamente valores da emissão no comprimento de onda de 6300 Å não atenuados.

## 6. DISCUSSÃO

Felizmente, na maior parte dos casos, os perfis de lumi-

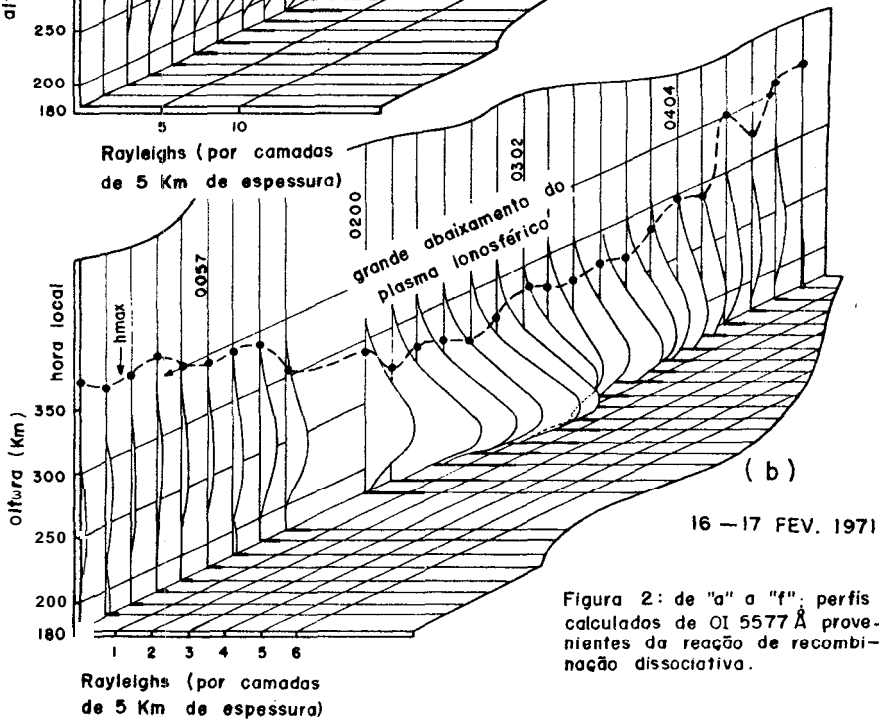
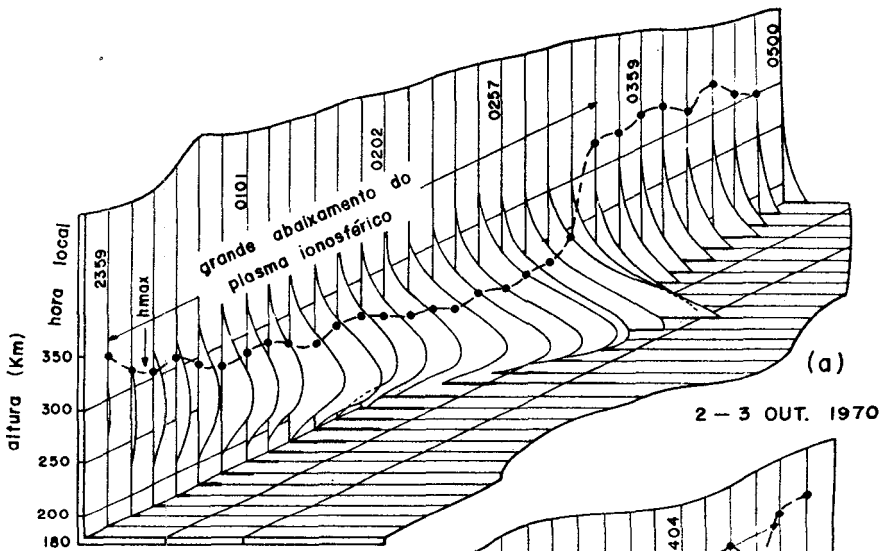
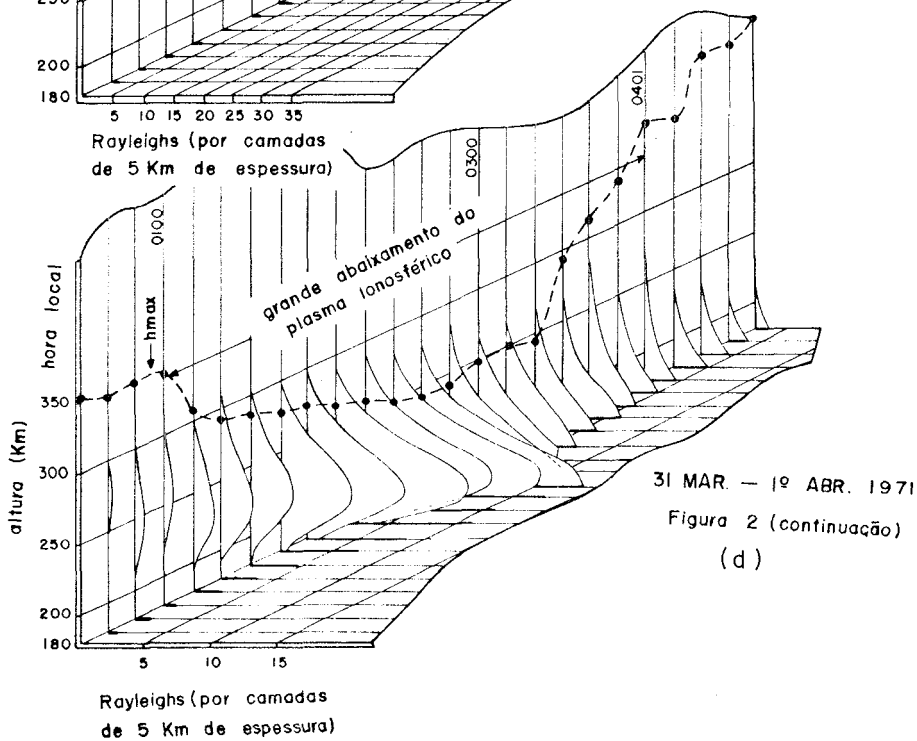
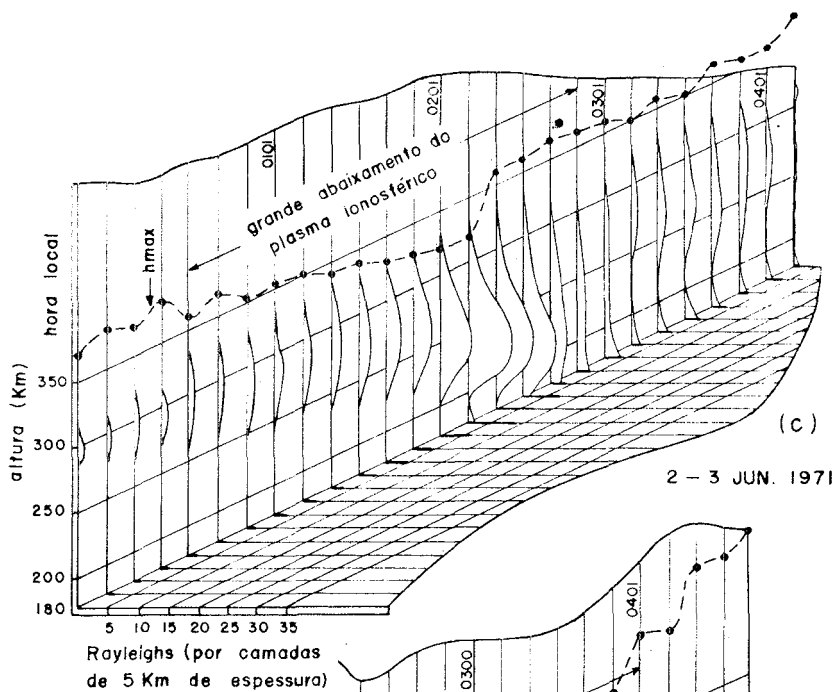
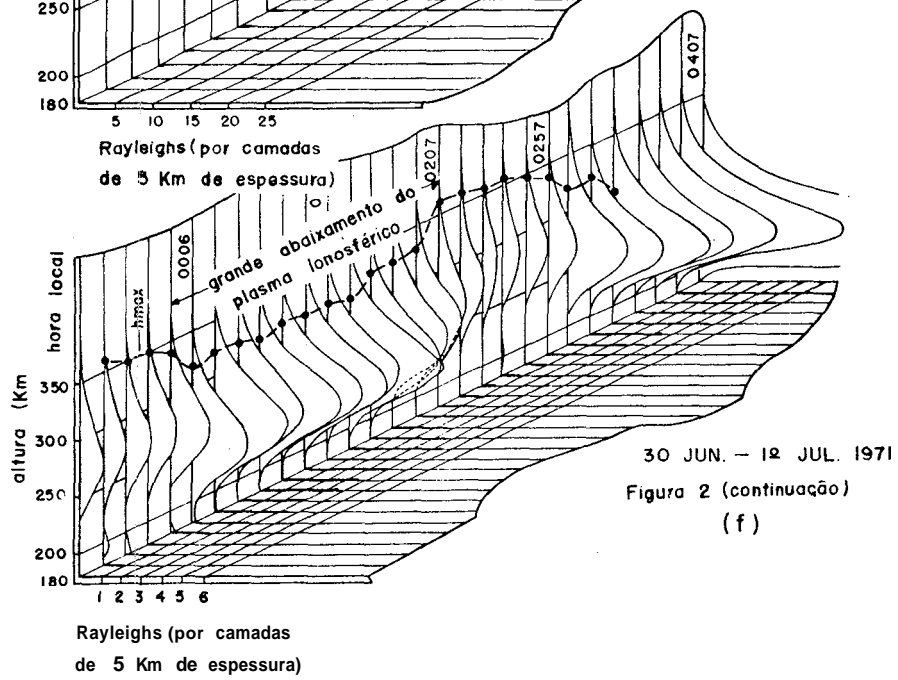
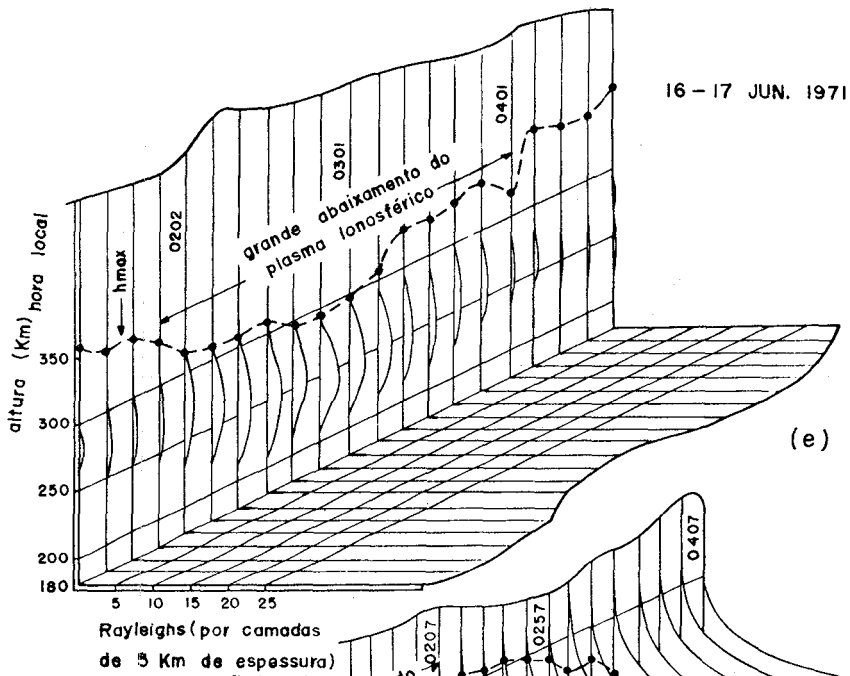


Figura 2: de "a" a "f": perfis calculados de OI 5577 Å provenientes da reação de recombinação dissociativa.







nescência situaram-se acima de 180 Km, permitindo assim, uma integração vertical completa que pudesse ser comparada com as observações fotométricas verticais. Os resultados indicam que as zonas de desexcitação, por colisões com o nitrogênio molecular, podem variar drasticamente. Quando a ionosfera desce da ordem de 80 Km ou mais, os perfis de L6300 prolongam-se para níveis inferiores a 180 Km. É claro que ela descerá abaixo deste nível, também dependendo da altura em que se encontrava anteriormente. As Figuras 2 de "a" a "f" mostram que antes do abaixamento característico de  $h_{\max}$ , a ionosfera se encontra em alturas que se podem diferenciar uma da outra de até aproximadamente 20 Km.

Nas Figuras 2 de "a" a "f" observa-se o abaixamento típico da ionosfera, em Arecibo, nas primeiras horas após a meia noite. Tal abaixamento é causado pela mudança de direção dos ventos neutros. Há controvérsias sobre se o que causa o abaixamento do plasma ionosférico é a mudança de  $180^\circ$  dos ventos de norte para sul ou se é apenas o decréscimo de sua intensidade. De qualquer modo a consequência é única: a difusão ambipolar do plasma, de cima para baixo, e ao longo das linhas de força do campo geomagnético. A inclinação de  $50^\circ$  das linhas do campo geomagnético, em Arecibo, faz com que a dinâmica do plasma ionosférico fique altamente dependente destas linhas.

A Figura 2 "f" mostra um abaixamento muito grande da ionosfera por volta de 04:00 hs. O aspecto senoidal que descrevem os máximos dos perfis sugerem, à primeira vista, que os abaixamentos desta noite foram provocados por uma onda de gravidade de período muito longo. Mas é possível também que o primeiro abaixamento da ionosfera desta noite, seja isolado, como levam a crer os abaixamentos, de logo após a meia noite, de outras noites, que não são seguidos de outros abaixamentos. Nesse caso, o segundo abaixamento desta noite pode ter sido causado por campos elétricos orientados de leste para oeste que, eventualmente, possam ter aparecido por efeito dínamo.

## 7. CONCLUSÕES

Nota-se que o par, radar de espalhamento incoerente fotômetro 6300 Å, devido à precisão dos dados de densidade eletrônica mos-

trou-se de razoável precisão na construção dos perfis de L6300 e de L5577. A precisão dos dados de densidade eletrônica é uma das maiores que se podem obter com as técnicas atuais. Dados de ionosonda resultariam em erros, possivelmente grosseiros, na extrapolação do perfil de densidade eletrônica acima do pico. A calibração do fotômetro é essencial para que seus resultados levem à adoção de um modelo adequado de atmosfera neutra.

Os resultados obtidos nos permitem concluir o seguinte:

1) Durante as grandes descidas do plasma ionosférico, tal como no período de logo após a meia noite, o pico dos perfis de intensidade de L5577 podem aumentar até da ordem de dezenas de vezes (vide Figura 2).

2) A maior parte dos perfis de L5577 provenientes de recombinação dissociativa na região F, encontra-se abaixo do pico de densidade eletrônica,  $h_{\max}$ . Os gráficos da Figura 2 sugerem que a contribuição da região acima de  $h_{\max}$ , para a produção de L5577, aumenta durante as grandes quedas do plasma ionosférico. Fora do período da queda esta contribuição é praticamente nula.

3) A Figura 1 sugere que o perfil da emissão não atenuada está, em média, deslocado para baixo em relação ao perfil da emissão atenuada. Por outro lado, como no ítem 2 acima, a maior parte dos perfis não atenuados, ou seja de L5577, está abaixo de  $h_{\max}$ . Isto indica que os perfis de L5577 são mais diretamente encontrados do que os perfis de L6300, se os dados de densidade eletrônica forem fornecidos por ionosonde.

4) Nas seis noites de observação da Figura 2 a emissão L5577 é praticamente inexistente acima de 350 Km de altura. Obviamente isto se aplica também à emissão de L6300. A altura mínima de contribuição de L5577 normalmente ocorreu acima da altura mínima de observação do radar, ou seja, cerca de 180 Km de altura.

Este trabalho foi parcialmente subvencionado pela Universidade de Cornell, EEUU, e pelo Instituto de Pesquisas Espaciais, Brasil.

O autor agradece as sugestões do Dr. Y. Sahai para o presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

1. Evans, J.V. "Theory and Practice of ionosphere study by Thomson scatter radar." Proc. IEEE, 57, 496, 1969.
2. Carlson, H.C.C. "Ionospheric heating by magnetic conjugate point photoelectrons." J. Geophys. Res., 71, 195, 1966.
3. Thome, G.D. "Long period waves generated in the polar ionosphere during the onset of magnetic storms." J. Geophys. Res., 73, 6319, 1968.
4. Wand, R.H. e F.W. Perkins. "Radar Thomson scatter observations of temperature and ion-neutral collision frequency in the E-region." J. Geophys. Res., 73, 6370, 1968.
5. Petit, M. "Mésures de températures, de densité électronique, et de composition ionique dans l'ionosphere par diffusion de Thomson, étude du déséquilibre thermodynamique dans l'ionosphere diurne." Ann. Geophys., 24, 1, 1968.
6. Swartz, W.E. e J.S. Nisbet. "Diurnal variation of the neutral temperature profile at Arecibo from incoherent-scatter measurements and its relevance to the 1400 density maximum." J. Geophys. Res., 76, 185, 1970.
7. Waldteufel, P. e L. Cogger. "Measurements of the neutral temperature at Arecibo." J. Geophys. Res., 76, 5322, 1971.
8. Harper, R.M. "Nighttime meridional neutral winds near 350 Km at low midlatitudes." J. Atm. Terr. Phys., 35, 2023, 1973.
9. Sobral, J.H.A. *Airglow and incoherent scatter studies of the dynamics of the nighttime ionosphere at Arecibo*. Ph.D. Thesis Cornell University, Ithaca, New York, EEUU, 1973.
10. Zambutti, C.J. "Atmospheric Wave Observations at Arecibo", J. Atm. Terr. Phys., 37, 625 (1975).
11. Barbier, D., "Deux phénomènes particuliers présentés par la raie rouge de la lumière du ciel nocturne." Ann. Géophys., 21, 228, 1965.

12. Peterson, V.L., T.E. Vanzandt e R.B. Norton. "F-region nightglow emissions of atomic oxygen!" JGR, 71, 2255, 1966.
13. King, J.W. "Airglow observations and the decay of the ionospheric equatorial anomaly!" J. Atm. Terr. Phys., 30, 391, 1968.
14. Rao, V.R. e P.V. Kulkarni. "6300 Å night airglow enhancements in low latitudes!" J. Atm. Terr. Phys., 35, 193, 1973.
15. Kulkarni, P.V. e V.R. Rao. "6300 Å nightglow emission over the magnetic equator!" Ann. Geophys., 28, 475, 1972.
16. Thuillier, G., J.W. King e A.J. Slater. "An explanation of the longitudinal variation of the O(1D) (6300 nM) tropical nightglow intensity!" J. Atm. Terr. Phys., 138, 155, 1976.
17. Bittencourt, J.A., B.A. Tinsley, G.T. Hickes e E.I. Reed. "Tropical F-region winds from [O I] 1356 Å and [O I] 6300 Å emission, 2, analysis ofOGO - 4 data!" J. Geophys. Res., 81, 3786, 1976.
18. Jacchia, L.G. "New static models of the thermosphere and exosphere with empirical temperature profiles!" Smithsonian Astrophys. Obs., Cambridge, special report n° 332, 1971.
19. Wickwar, V.B., L.L. Cogger e H.C. Carlson. "The 6300 Å O(1D) airglow and dissociative recombination!" Planet. Space Sci., 22, 709, 1974.
20. Cogger, L.L., V.B. Wickwar e H.C. Carlson. "Combined airglow and incoherent scatter observations as a technique for studying neutral atmospheric variations!" Radio Science, 9, 205, 1974.
21. CIRA - *Cospar INTERNATIONAL REFERENCE ATMOSPHERE*. Compiled by COSPAR working group IV - North Holland Publishing Co., 1965.
22. Smith, D. e R.A. Fouracre. "The temperature dependence of the reaction rate coefficients of O<sup>+</sup> ions with molecular oxygen and nitrogen!" Planet. Space Sci., 16, 243, 1968.
23. Meher, F.J. e M.A. Biondi, "Electron temperature dependence of recombination of O<sub>2</sub><sup>+</sup> and N<sub>2</sub><sup>+</sup> ions with electrons!" Phys. Rev., 18,264,1969.
24. Fite, W.L. "Positive ion reactions!" Can. J. Chem., 17, 1947, 1969.
25. Biondi, M.A. "Atmospheric electron-ion and ion-ion recombination processes!" Can. J. Chem., 47, 1711, 1969.
26. Zipf, E.C. "The dissociative recombination of O<sub>2</sub><sup>+</sup> ions into specifically identified final atomic states!" Bull. Am Phys. Soc. 15,418, 1970.