

1. Classificação <i>INPE.COM.10-PE</i> <i>CDU: 550.388.2</i>	2. Período <i>Julho 1978</i>	4. Critério de Distribuição:  interna <input type="checkbox"/>  externa <input checked="" type="checkbox"/>
3. Palavras Chaves (selecionadas pelo autor) <i>Composição Iônica;</i> <i>Produção de Íons por Partículas.</i>		
5. Relatório nº <i>INPE-1300-PE/145</i>	6. Data <i>Julho 1978</i>	7. Revisado por <i>J. A. V. Dias</i> <i>Luiz A. Vieira Dias</i>
8. Título e Sub-Título <i>UM ESTUDO NUMÉRICO DAS VARIAÇÕES NA COMPOSIÇÃO IÔNICA NA BAIXA IONOSFERA DURANTE UM ECLIPSE SOLAR</i>		9. Autorizado por <i>Nelson de Jesus Parada</i> <i>Parada</i> Diretor
10. Setor <i>DCE/GIO</i>	Código <i>30.371</i>	11. Nº de cópias <i>18</i>
12. Autoria <i>Inez S. Batista</i> <i>M.A. Abdu</i> <i>J.H.A. Sobral</i>		14. Nº de páginas <i>21</i>
13. Assinatura Responsável <i>Inez S. Batista</i>		15. Preço
16. Sumário/Notas  <i>São usados modelos detalhados da química de íons na regiões D e E da ionosfera para simular as variações esperadas na composição de íons durante um eclipse total do sol. A equação da continuidade é resolvida, numericamente, para 29 espécies iônicas positivas e 8 espécies iônicas negativas, considerando condições de não equilíbrio. Os resultados são comparados com as medidas "in situ", disponíveis para as várias espécies iônicas e densidade eletrônica durante um eclipse solar, com o objetivo de estimar e discutir parâmetros ionosféricos, tais como fontes de ionização e taxas de reações, que são importantes na formação de íons por agrupamento com moléculas de água.</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>		

UM ESTUDO NUMÉRICO DAS VARIAÇÕES NA COMPOSIÇÃO IÔNICA  
NA BAIXA IONOSFERA DURANTE UM ECLIPSE SOLAR

Inez S. Batista, M.A. Abdu e J.H.A. Sobral

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq

12200 São José dos Campos, SP

RESUMO

São usados modelos detalhados da química de íons nas regiões D e E da ionosfera para simular as variações esperadas na composição de íons durante um eclipse total do sol. A equação da continuidade é resolvida, numericamente, para 29 espécies iônicas positivas e 8 espécies iônicas negativas, considerando condições de não equilíbrio. Os resultados são comparados com as medidas "in situ", disponíveis para as várias espécies iônicas e densidade eletrônica durante um eclipse solar, com o objetivo de estimar e discutir parâmetros ionosféricos, tais como fontes de ionização e taxas de reações, que são importantes na formação de íons por agrupamento com moléculas de água.

## 1 - INTRODUÇÃO

Um eclipse solar oferece excelente oportunidade para o estudo de muitos processos físicos e químicos que ocorrem na baixa ionosfera. Durante um evento dessa natureza, há uma rápida variação da ionização devida à radiação solar e uma consequente resposta da baixa ionosfera, a qual é dominada por processos químicos que incluem recombinação, "attachment", "detachment" e reações de neutralização.

No presente trabalho são usados modelos detalhados da química de íons, nas regiões D e E da ionosfera, para simular as variações esperadas na composição de íons durante um eclipse total do sol. O método de análise, bem como o esquema das reações químicas e as taxas de produção de íons utilizadas, estão descritos em um outro trabalho (Abdu et al., 1978). Os dados usados para comparação com nossos cálculos foram retirados de resultados publicados, referentes a uma série de lançamentos de foguetes, que teve lugar em Cassino, Brasil, localidade situada na região da anomalia geomagnética do Atlântico Sul (ou anomalia geomagnética brasileira). Esses lançamentos foram feitos durante o eclipse total do sol em 12 de novembro de 1966 e foram medidas densidade eletrônica e composição iônica na baixa ionosfera (Narcisi et al., 1972; Ulwick, 1972; Mechtly et al., 1969).

Nossos cálculos foram realizados de tal forma que os valores calculados da densidade iônica total ( $\sum N_i^+$ ), bem como a taxa calculada  $[NO^+] / [O_2^+]$ , iguallassem os valores observados antes do início do eclipse. Para isso, foram feitos ajustes nas taxas de produção de

Íons usadas como parâmetros de entrada e, também, na concentração de  $\bar{O}$  xido nítrico (NO), por representar um papel importante na determinação da taxa  $[NO^+]/[O_2^+]$  através da reação  $O_2^+ + NO \rightarrow NO^+ + O_2$ . A seguir, os valores iniciais, supostos ou calculados, usando condição de equilíbrio das equações da continuidade para cada espécie, foram introduzidos na solução dependente do tempo, e novos valores de densidade iônica e eletrônica foram calculados durante as diversas fases do eclipse. Comparando os valores calculados com os observados, durante o máximo do eclipse (obscurecimento total do sol), é feita uma tentativa para derivar a taxa de produção de íons devida a partículas energéticas carregadas, que se precipitam na alta atmosfera, na região da anomalia geomagnética. Em trabalhos anteriores, usando dados de ionosonda operando na região da anomalia geomagnética, foi mostrada a evidência de precipitação de partículas em períodos noturnos quietos, bem como um acentuado aumento dessa precipitação seguindo tempestades magnéticas de intensidade moderada (Abdu e Batista, 1977; Batista e Abdu, 1977).

## 2. SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DA CONTINUIDADE

Montado o esquema para 29 espécies iônicas positivas e 8 espécies iônicas negativas, as equações da continuidade são resolvidas numericamente, supondo equilíbrio entre produção e perda de cada espécie iônica, sem o termo de variação temporal. Dessa forma, são deduzidas as concentrações de equilíbrio de todas as espécies iônicas utilizadas no modelo, em intervalos de 2 Km. Para cada altura é feito um teste para verificar se a neutralidade de carga ( $\sum N_i^+ = \sum N_i^- + [e]$ ) está sendo satisfeita. Além disso, os valores calculados de  $\sum N_i^+$  e

$[NO^+]/[O_2^+]$  são ajustados para igualarem os valores observados antes do início do eclipse. Isso foi conseguido mediante ajustes nas taxas de produção e na concentração de NO, da forma descrita por Abdu et al., (1978). Os valores supostos ou calculados, usando soluções de equilíbrio das equações da continuidade, foram usados como valores iniciais da solução das equações dependentes do tempo.

As taxas de produção de íons variam, durante o eclipse, de acordo com uma função de obscurecimento  $R(t)$ , definida como a razão entre a área não eclipsada e a área total do sol, dada por:

$R(t) = (\pi - \Theta(t) + \text{sen } \Theta(t))/\pi$ , onde  $\cos \Theta(t) = 1 + 8 t(t/T-1)/T$ . Nessas expressões  $t$  é o tempo medido a partir do primeiro contacto,  $T$  é a duração do eclipse,  $\Theta$  é o ângulo, com vértice no centro do círculo solar, subtendido pelos pontos de intersecção entre o disco solar e o lunar. Também foram consideradas taxas de produção residuais de íons, que não se anulam durante o máximo do eclipse, supondo que as mesmas são proporcionais aos fluxos residuais tomados como 5,2 % para raios-X entre 1-10 Å, 16 % para raios-X entre 30-100 Å (Accardo et al., 1972) e 0,52% para Lyman  $\alpha$  e Lyman  $\beta$  (Smith, 1972).

Na solução numérica das equações de continuidade, para as espécies iônicas, foi usada a relação

$$N_{i,j}^{\pm} = N_{i,j-1}^{\pm} + (P_{i,j-1} - L_{i,j-1}) \Delta t,$$

onde  $N_{i,j}^{\pm}$  é a concentração da espécie iônica  $i$ , positiva ou negativa, no tempo  $j$ , medida a partir do início do eclipse e  $P_{i,j}$  e  $L_{i,j}$  são as cor

respondentes taxas de produção e perda, respectivamente. O intervalo de tempo entre dois passos consecutivos da solução foi tomado como sendo de um segundo. No caso de uma espécie iônica tendo tempo de vida menor que um segundo, mantêm-se a solução de equilíbrio. Ao fim de cada passo da solução é feito o teste de neutralidade de carga  $\sum N_{i,j}^+ = \sum N_{i,j}^- + [e]_j$ .

A Figura 1 mostra perfis de densidade iônica total ( $\sum N_i^+$ ) calculados no instante em que 80 % da área do disco solar está obscura ( $\blacktriangle$ ) e durante o máximo do eclipse ( $\bullet$ ); as curvas (2) e (3) são os perfis correspondentes observados, conforme Narcisi et al. (1972). No caso da curva (3) foram usados os resultados de Mechtly et al. (1969), para densidade eletrônica acima de 95 Km, pelo fato de que Narcisi et al. não mediram densidade iônica nessas alturas e seus resultados, antes do início do eclipse, concordam com os resultados de Mechtly et al. entre 82 e 95 Km.

### 3. DISCUSSÃO

Como pode ser visto da Figura 1, as densidades iônicas durante o eclipse são menores que os valores observados, exceto no intervalo de altura entre 85 e 90 Km, onde os resultados calculados são maiores. Para esse último resultado consideramos duas possíveis explicações: (a) Os coeficientes usados para certas reações que, eventualmente controlam as taxas de perda de ionização, poderiam contribuir para a diferença. Porém, abaixo de 85 Km, os valores calculados são menores que os observados, parecendo contradizer tal possibilidade; (b) Os coeficientes de algumas reações importantes, que levam à formação de íons por

agrupamento com moléculas de água, partindo dos íons iniciais  $O_2^+$  e  $NO^+$ , são muito sensíveis à temperatura. Alguns desses coeficientes são proporcionais a  $T^{-3}$ . Assim, uma diminuição na temperatura mesosférica, durante o eclipse, poderia aumentar os coeficientes das reações, aumentando a formação dos referidos íons, os quais recombina mais rapidamente que os íons moleculares iniciais. Como não há medidas de perfis de temperatura durante o eclipse não há possibilidade de comprovar tal hipótese.

Abaixo de 90 Km, a química de íons é muito complexa e uma discussão mais completa dessa parte de nossos resultados exige o conhecimento de informações adicionais nesta região de altura.

Acima de 90 Km, a química de íons já é bem conhecida, permitindo que a diferença entre os valores calculados e observados, durante o máximo do eclipse e 80 % de obscurecimento do disco solar, sejam interpretados em termos de taxas de produção de íons. Como os valores calculados estão significativamente abaixo dos observados, esta diferença foi atribuída ao fato de não havermos incluído, em nossos cálculos, uma importante fonte adicional de ionização, que não varia durante o eclipse. Esta fonte de ionização foi atribuída a partículas carregadas que se precipitam na região da anomalia geomagnética. A taxa de produção de íons,  $q_p$ , devida a partículas, foi estimada da seguinte maneira: Sendo conhecida a taxa de ionização devida à radiação solar que permanece durante o obscurecimento total do sol, podemos fazer uma primeira estimativa do valor de  $q_p$ , necessário para explicar a densidade iônica observada durante o máximo do eclipse. Este valor de  $q_p$  é introduzi

do nos cálculos antes do início do eclipse, supondo condições de equilíbrio, para obter, novamente, valores iniciais para a solução dependente do tempo. A seguir, os novos valores iniciais, bem como a taxa de produção devida a partículas,  $q_p$ , são introduzidos na solução dependente do tempo, e os cálculos são novamente comparados com as observações. Dessa forma o processo é repetido, modificando-se  $q_p$ , até que os valores calculados de densidade iônica total coincidam com os observados. A Figura 2 mostra as taxas de produção calculadas.  $q_s$  é a taxa de produção devida à radiação solar, antes do início do eclipse;  $q_p$  a taxa de produção devida a partículas; e  $q_T = q_s + q_p$ .  $q_R$  é a fração da taxa de produção  $q_s$  que permanece durante o máximo do eclipse. Acima de 96 Km,  $q_p$  é quase uma ordem de grandeza maior que  $q_R$ . A introdução de  $q_p$  deixou praticamente inalterada a taxa de produção total, antes do início do eclipse; no entanto, no decorrer do mesmo e, sobretudo durante o máximo do eclipse,  $q_p$  torna-se importante fonte de ionização. São mostradas também, na figura 2, as taxas de produção de íons, devidas às radiações espalhadas Lyman- $\alpha$  e Lyman- $\beta$  (Ogawa e Tohmatsu, 1966), e que são, aproximadamente, um fator de 50 menores que a taxa de produção residual.

A Figura 3 mostra os resultados da densidade iônica total calculada, incluindo a taxa de produção devida a partículas,  $q_p$ . Durante o máximo do eclipse, os valores calculados (●) coincidem com os observados (curva 3). Para 80 % da área do disco solar obscurecida, os valores calculados (▲) estão, agora, mais próximos dos observados (curva 2) que no caso com  $q_p = 0$  (Figura 1), porém continuam menores.



A Figura 4 mostra as densidades numéricas das principais espécies positivas, no intervalo de altura entre 76 e 110 Km, calculadas usando a condição de equilíbrio das equações da continuidade. Pode-se ver que os íons, formados por agrupamento com moléculas de água, são importantes abaixo de 82 Km, aproximadamente, concordando com os resultados de Narcisi et al. (1972). As alturas dos picos de concentração de  $H_3O^+$  e  $H_7O_3^+$ , calculadas, concordam com as medidas, porém a densidade difere por um fator de aproximadamente 3, sendo menor nos cálculos. Nossos cálculos mostram  $NO^+.H_2O$  como o principal íon entre 76 e 82 Km, o que não concorda com as medidas de Narcisi et al. (1972), onde  $H_5O_2^+$  é o íon mais importante nesse intervalo de altura. Porém, cálculos teóricos feitos por Thomas (1976), mostram  $NO^+.H_2O$  com concentração significativa entre 70 e 90 Km e sua presença foi detectada em várias medidas, entre elas as de Johannessen e Krankowsky (1972). Uma comparação direta de nossos cálculos, abaixo de aproximadamente 82 Km, com as medidas de Narcisi et al. (1972), não é possível, principalmente, por dois motivos: (1) a incerteza na precisão das medidas com foguete, dos íons formados por agrupamento com moléculas de água, devido ao fato de que os íons mais pesados são mais fracamente ligados, podendo haver desprendimento de moléculas de água durante o processo de medida; (2) possíveis incertezas em certos coeficientes das reações, que levam à formação dos íons por agrupamento com moléculas de água a partir do íon inicial  $NO^+$ .

A Figura 5 compara a taxa  $[NO^+]/[O_2^+]$ , calculada, com a observada por Narcisi et al. (1972) para as condições de antes do início do eclipse (curva 1), 80 % de obscurecimento do disco solar (cur

vas 2) e para o máximo do eclipse (curvas 3). Podemos notar que a inclusão de uma produção extra diminui a taxa  $[NO^+]/[O_2^+]$ , calculada, tornando-a mais próxima dos valores medidos.

Num estudo recente, por Abdu e Batista (1977), foi feita uma tentativa de estimar as taxas de produção de íons, devidas às partículas precipitadas, que deveriam estar presentes regularmente na região da anomalia geomagnética, para explicar a ocorrência de camadas E esporádicas, do tipo bloqueador, à noite. Aquele estudo mostrou que, para o período analisado, a média mensal da taxa de produção de íons por partículas era, aproximadamente, duas ordens de grandeza maior que a taxa de produção devida à radiação espalhada Lyman- $\beta$  calculada por Ogawa e Tohmatsu (1966). O presente estudo mostra que, no dia do eclipse, um dia relativamente calmo ( $A_p = 8$ ), a taxa de produção de íons,  $q_p$ , era, aproximadamente, 200 - 500 vezes aquela devida à radiação espalhada, o que está de acordo com os cálculos anteriores, os quais eram uma estimativa do limite inferior.

#### 4. CONCLUSÃO

Foram analisados os dados de composição iônica e densidade eletrônica, medidos por foguete na região da anomalia geomagnética do Atlântico Sul, durante o eclipse total do sol de 12 de novembro de 1966, a fim de estimar, quantitativamente, uma possível taxa de produção de íons devida a partículas carregadas que se precipitam na alta atmosfera. Usamos, em nossos cálculos, as medidas feitas durante o máximo do eclipse, quando a produção de íons, devida a fontes diferentes da

radiação solar, torna-se importante, facilitando sua detecção. O método de análise é o mais completo possível, dentro do presente conhecimento da química de íons na baixa ionosfera.

Os resultados de nossos cálculos mostram que, abaixo de, aproximadamente, 90 Km a comparação com as observações é difícil, devido à natureza complexa da química de íons positivos nessa parte da baixa ionosfera. Se estiverem corretas as medidas de laboratório dos coeficientes das reações que levam à formação de íons por agrupamento com moléculas de água, nossa análise indica a possibilidade de uma variação na temperatura mesosférica durante o eclipse.

Acima de 90 Km, onde os processos químicos já são bem conhecidos, uma comparação entre nossos cálculos e as medidas de foguete durante o máximo do eclipse indica, claramente, a presença de uma fonte de ionização diferente da radiação solar direta e espalhada. Esta fonte extra, que nós atribuímos a partículas carregadas que se precipitam, é bastante significativa durante as condições geomagneticamente calmas, em que foram efetuadas as medidas.

BIBLIOGRAFIA

- ABDU, M.A. and I.S. BATISTA. Sporadic E-layer phenomena in the Brazilian Geomagnetic Anomaly: evidence for a regular particle ionization source. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 39, 723-731, 1977.
- ABDU, M.A., I.S. BATISTA and J.H.A. SOBRAL. Particle ionization in the lower ionosphere over the South Atlantic Geomagnetic Anomaly, from rocket results during the total solar eclipse of November 1966. INPE-1256-PE/133, 1978.
- ACCARDO, C.A., L.G. SMITH and G.A. PINTAL. Rocket observations of solar X-rays during the eclipse of March 7, 1970. *J. Atmos. Terr. Phys.* 34, 613-620, 1972.
- BATISTA, I.S. and M.A. ABDU. Magnetic storm associated delayed sporadic-E enhancements in the Brazilian geomagnetic anomaly. *J. Geophys. Res.*, 82, 4777-4783, 1977.
- JOHANNESSEN, A. and D. KRANKOWSKY. Positive ion composition measurements in the upper mesosphere and lower thermosphere at a high latitude during summer. *J. Geophys. Res.*, 77, 2888-2901, 1972.
- MECHTLY, E.A., K. SEINO and L.G. SMITH. Lower ionosphere electron densities measured during the solar eclipse of November 12, 1966. *Radio Sci.*, 4, 371-375, 1969.



LEGENDA DAS FIGURAS

Figura 1 - Perfis de densidade total de íons positivos medidos por Nar\_ cisi et al. (1972) e calculados. As curvas contínuas (1), (2) e (3) correspondem às medidas antes do início do eclips\_ se, 80 % de obscurecimento do disco solar e obscurecimento total do sol, respectivamente. A parte da curva (3) acima de 96 Km foi extraída de Mechtly et al. (1969). Os cálculos correspondentes a 80 % e obscurecimento total estão marcados com (▲) e (●) respectivamente. A curva (x) corresponde ao valor inicial usado nos cálculos.

Figura 2 - Taxas de produção de íons calculadas após a inclusão da com\_ ponente devida à precipitação de partículas ( $q_p$ ).  $q_s$  é a ta\_ xa de produção devida à radiação solar direta e  $q_T = q_p + q_s$  é a taxa de produção total que explica o perfil de densidade iônica total antes do início do eclipse.  $q_R$  é a taxa de pro\_ dução devida à radiação solar residual, que permanece duran\_ te o máximo do eclipse. As curvas  $L_\alpha$  e  $L_\beta$  dão as taxas de produção de íons devidas à radiação UV espalhada (Ogawa e Tohmatsu, 1966).

Figura 3 - Perfis de densidade total de íons positivos usando a taxa de produção inicial  $q_T$  da Figura 2. As identificações das curvas são as mesmas da Figura 1.

Figura 4 - Perfis de vários íons positivos obtidos em nossos cálculos.

Figura 5 - Perfis da taxa  $[NO^+]/|O_2^+|$ . As curvas 1(—●—), 2(---+---) e 3(--x--) representam as medidas feitas por Narcisi et al. (1972) antes do início do eclipse, 80 % e obscurecimento total do sol, respectivamente. A curva 2(—●—) representa os resultados calculados para 80 % de obscurecimento do disco solar e as curvas (3) representam os cálculos durante o máximo do eclipse onde 3(—▲—) inclui  $q_p$  e 3(—△—) não inclui  $q_p$ .

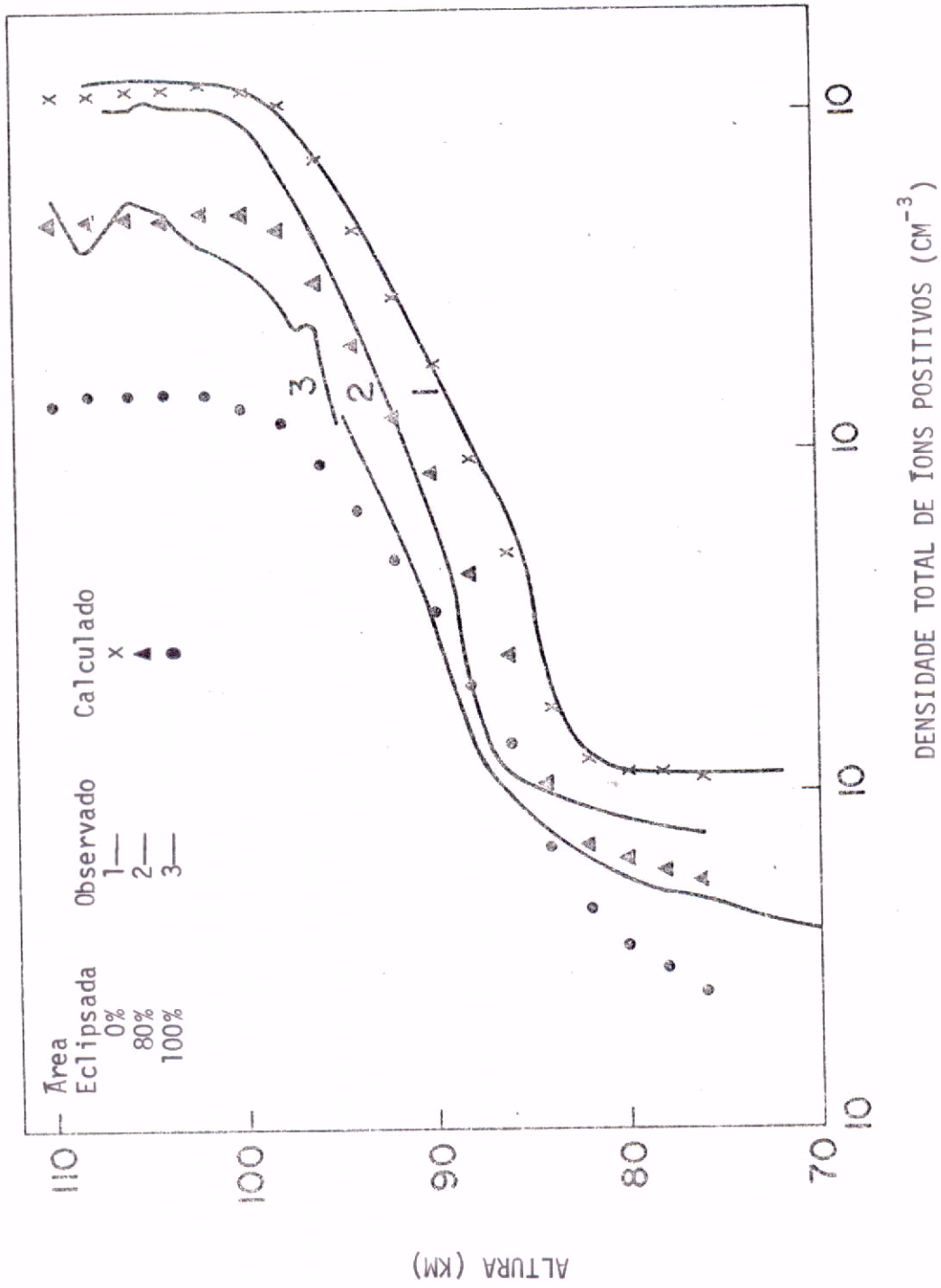
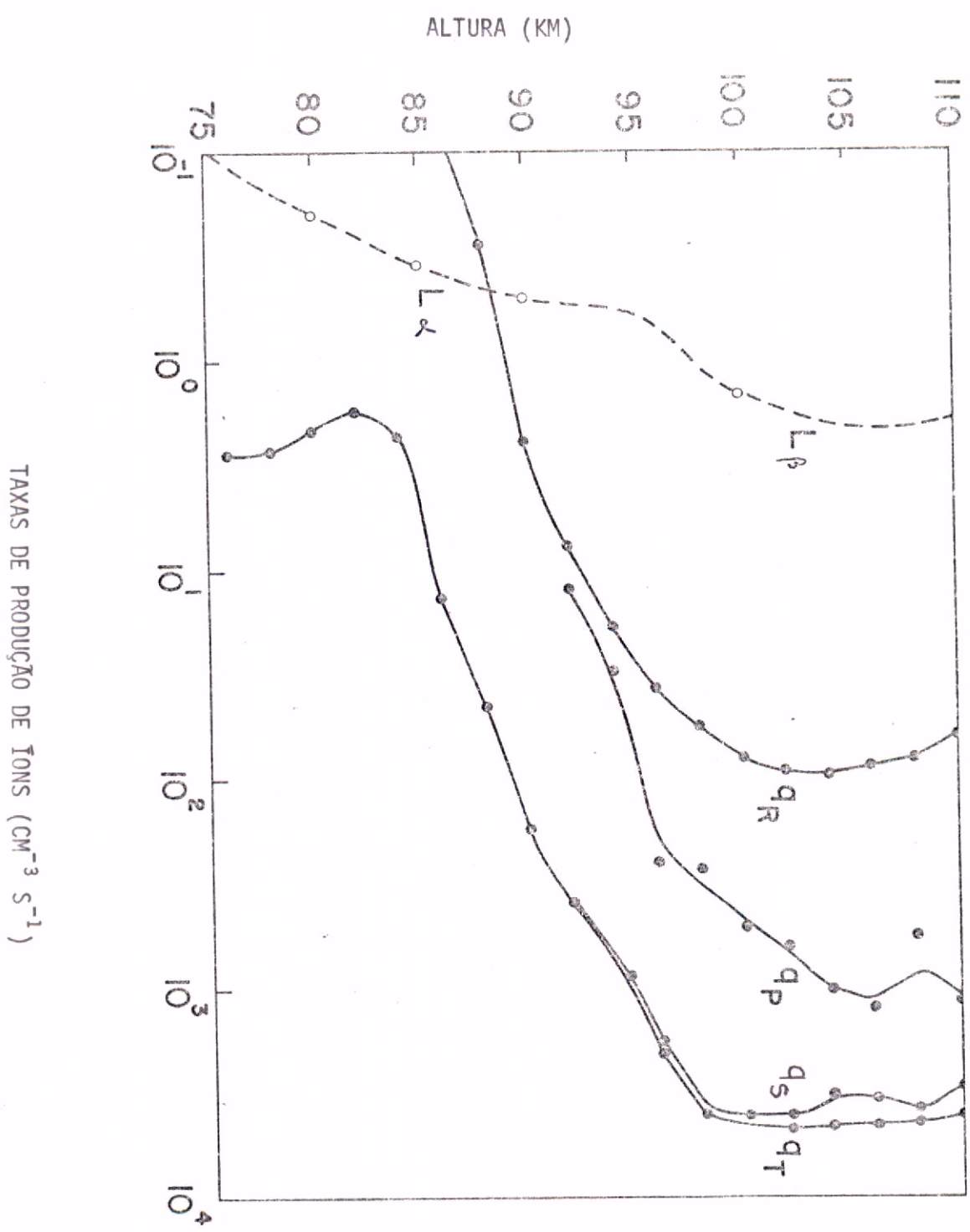


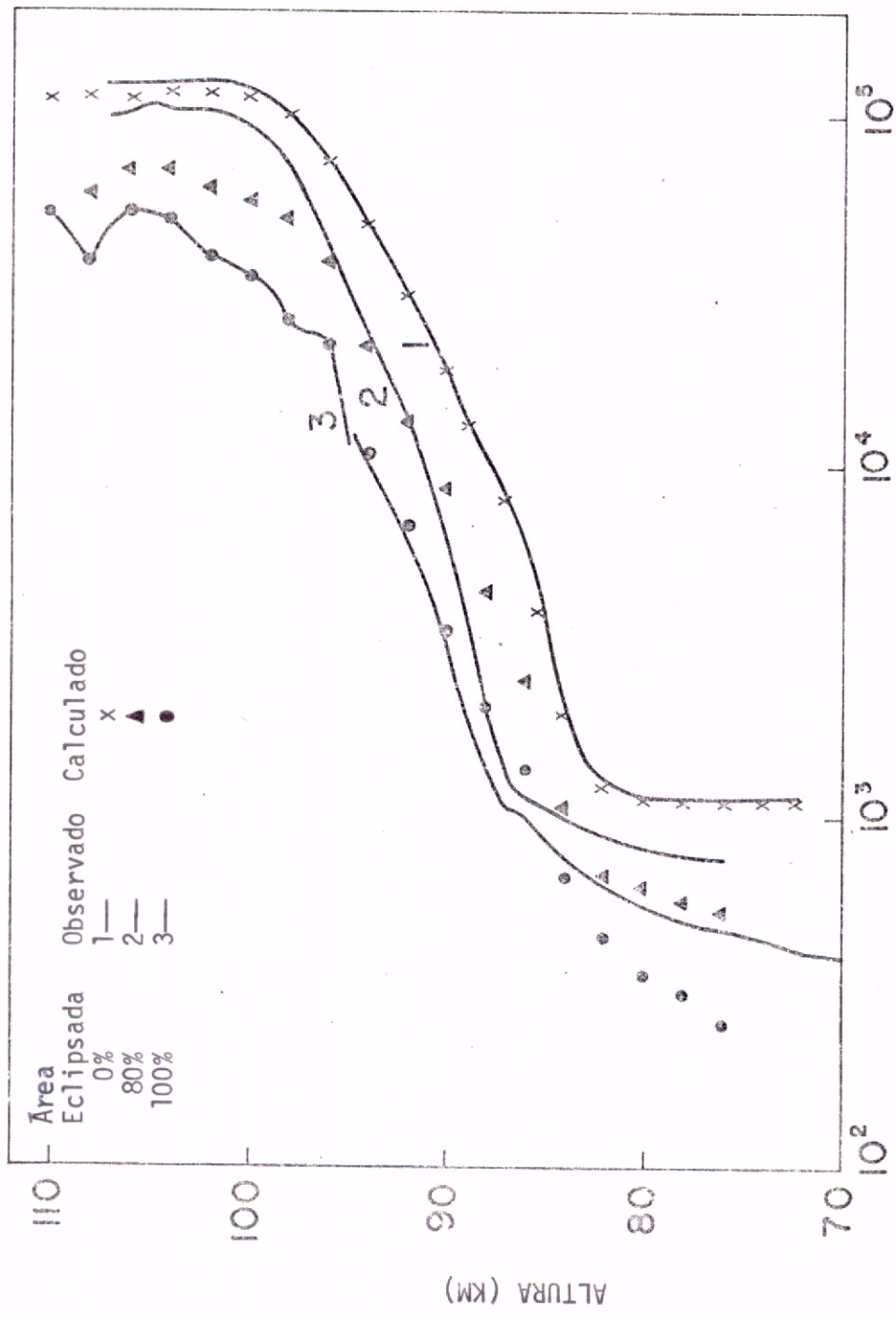
Fig. 1





TAXAS DE PRODUÇÃO DE IONS ( $\text{CM}^{-3} \text{S}^{-1}$ )

Fig. 2



DENSIDADE TOTAL DE ÍONS POSITIVOS (CM<sup>-3</sup>)

Fig. 3

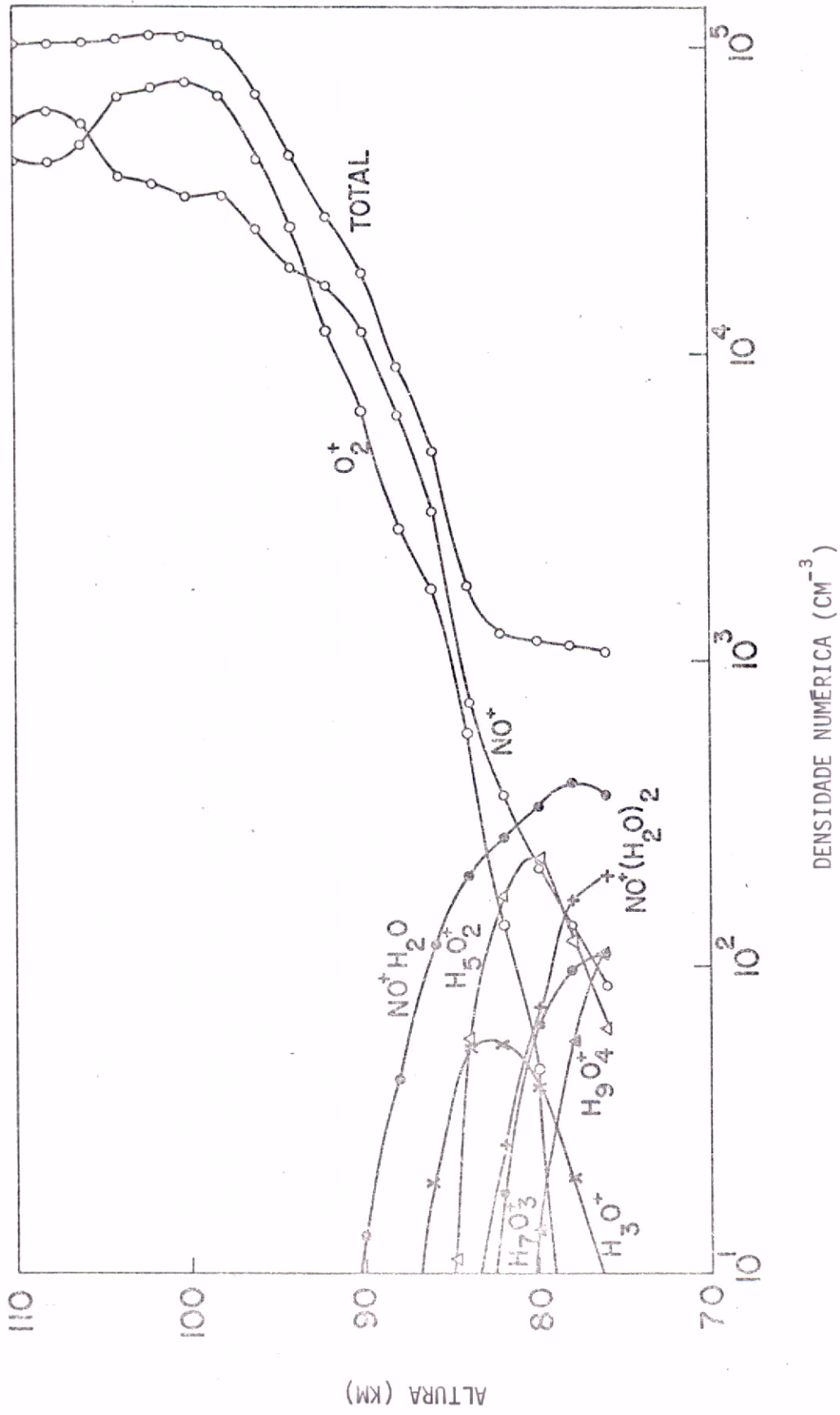


Fig. 4

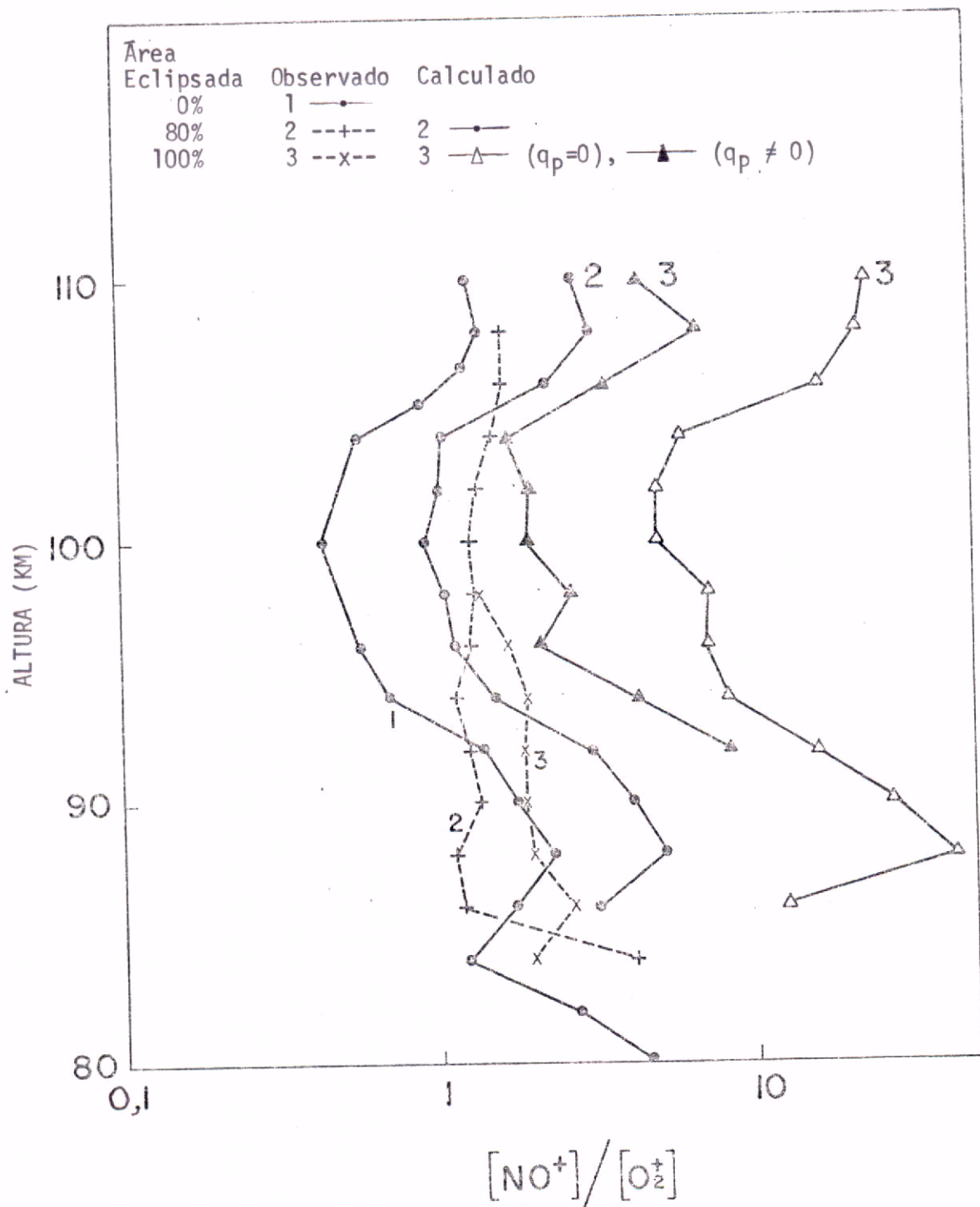


Fig. 5