

## EFEITOS DE EXPLOSÕES SOLARES NA BAIXA IONOSFERA NA REGIÃO DA ANOMALIA GEOMAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL

MARA LÚCIA VASCONCELOS JUSTO ANZALONI

*Centro Técnico Aeroespacial – IAE  
12.200 – São José dos Campos, SP, Brasil*

VERA LÚCIA R. KUNTZ

*Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE  
C.P. 515, 12.200 – São José dos Campos, SP, Brasil*

Two different techniques were used to analyse comparatively the behaviour of the D-Region when solar flares occur. The first one uses an oblique LF/VLF ionosonde at 35 kHz and 45 kHz, located in the South Atlantic Geomagnetic Anomaly (SAGA) region, close to its central point. The second one uses long distance VLF propagation phase measurements at 16 kHz, crossing only part of the SAGA. Several parameters were analysed, such as ionospheric reflection height, ionospheric ionization and recovery time, duration and the recombination coefficient for each event.

Solar flare ionization times appear to be larger for ionosonde data, compared to long distance propagation data. Recovery times and total durations are shorter for ionosonde data. Similar values of recombination coefficient are found for both techniques. However, the dependence of the recombination coefficient on the flare X-ray intensity is different for the two techniques.

### INTRODUÇÃO

Quando ocorrem explosões solares (flares) há um efeito conhecido na ionosfera que é o aumento de ionização causado pelo aumento do fluxo de raios X. Este aumento de ionização, para ondas de baixa/muito baixa frequência (LF/VLF), que se propagam no guia de onda formado entre a Terra e a camada inferior da ionosfera, se manifesta como um abaixamento da camada inferior desse guia de onda (região D da ionosfera).

Estudos sobre efeitos de explosões solares na ionosfera foram feitos por Nicolet & Aikin (1960); Crain (1961); Chilton et al., (1963); Whiten et al., (1965); Chilton et al., (1965), Montbriand & Belrose (1972); Mitra (1974). Alguns efeitos de explosões solares na ionosfera da região da Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul (SAGA) foram estudados por Kaufmann et al., (1967); Kaufmann & Paes de Barros (1969); Kaufmann & Mendes (1970); Ananthkrishnan et al., (1973).

Este trabalho trata do estudo comparativo de efeitos de explosões solares na ionosfera, detetados por dois tipos de experimentos: a) refletividade de LF/VLF (35 kHz e 45 kHz), obtida com uma ionosonda oblíqua de LF/VLF, com transmissor em Paula Freitas, PR (26° 12'S, 50° 59' W) e o receptor em Gaspar, SC (26° 55'S, 48° 56'W), distanciados de 218 km um do outro e localizados próximos

ao centro da SAGA; b) propagação de sinais de VLF a longa distância, em 16 kHz, no trajeto GBR em Rugby, Inglaterra (52° 27' N, 01° 11' W) – Atibaia, SP, Brasil, (23° 11' S, 46° 33' W), com pequena parte do trajeto dentro da SAGA. A Fig. 1 mostra a localização das duas trajetórias e contornos de valores de campo magnético constante da SAGA.

### TÉCNICA EXPERIMENTAL

Foram utilizados neste trabalho efeitos na ionosfera causados por explosões solares ocorridas no período de 1980-1981 e detetados pelas duas técnicas acima descritas.

Somente foram selecionadas explosões cujo valor máximo do fluxo de raios X,  $\Phi$ , foi  $> 10^{-2}$  erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, que corresponde às explosões do tipo M e X, segundo classificação do Preliminary Report and Forecast of Solar Geophysical Data, NOAA (1980-1981), medidos pelos satélites da série SMS e GOES.

Para evitar as variações de altura que ocorrem normalmente próximo ao amanhecer e anoitecer só foram analisadas explosões ocorridas entre 10:00UT e 20:00UT, em um total de 16, para a ionosonda e 23, para VLF de longa distância.

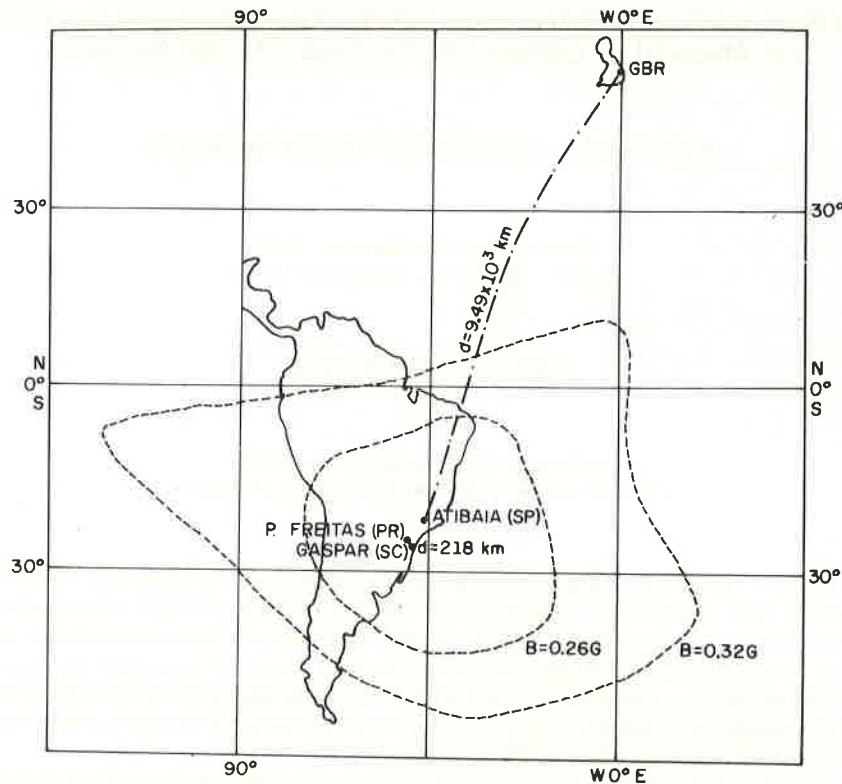


Figura 1 — Trajetos de propagação de ondas de VLF de longa distância (GBR, Rugby, Inglaterra — Atibaia, SP, Brasil) e de curta distância (Paula Freitas, PR — Gaspar, SC) e contornos de valores de campo magnético constante da SAGA.

Variações máximas de altura em relação à média, tempo de ionização, de recuperação, duração total e taxa de recombinação foram os parâmetros calculados para cada explosão solar, com os dados da ionossonda e de VLF de longa distância.

A altura de reflexão ionosférica obtida através da ionossonda oblíqua é calculada medindo-se a diferença de tempo de chegada ao receptor da onda terrestre e da onda ionosférica (Lewis et al., 1973). A variação de altura obtida através dos dados de VLF de longa distância é calculada utilizando dados de fase e amplitude dos sinais de VLF e o modelo de condutividade e densidade exponencial de Wait (1964), onde  $\Delta h/D$  é a variação da altura  $\Delta h$  normalizada pela distância  $D$ , entre o transmissor e o receptor.

O coeficiente de recombinação ( $\alpha$ ) foi obtido por meio da relação

$$\left( \frac{dN_e}{dt} = q - \alpha N_e^2 \right)$$

onde  $q$  é a razão de produção iônica e  $N_e$  a densidade eletrônica, descrita pelo gradiente de condutividade  $\beta$  e pela altura de referência  $H$ , segundo a convenção introduzida por Wait e Spies, 1964. Esta relação dá a variação da densidade eletrônica com o tempo, decorrente do aumento de raios X devido a uma explosão. No período de recuperação ionosférica, quando não mais existe produção extra de íons devido ao aumento de raios X, têm-se:

$$\frac{dN_e}{dt} = -\alpha N_e^2$$

Uma vez conhecidos  $dN_e/dt$  e  $N_e$ , podemos obter os valores de  $\alpha$  para cada explosão.

## ANÁLISE DOS RESULTADOS

Devido ao reduzido número de eventos analisados, os resultados obtidos devem ser considerados preliminares.

Alturas de reflexão médias de dias anteriores e posteriores à ocorrência de explosões solares e alturas de reflexão decorrentes de explosões solares foram calculadas para todos os eventos analisados, utilizando dados da ionossonda oblíqua. A Fig. 2(a) e (b) mostra as alturas médias com os respectivos desvios padrões associados e as alturas durante a ocorrência de explosões X4.4 e M2.1, respectivamente, no dia 05 de novembro de 1980, para as frequências de 35 e 45kHz. Os abaixamentos máximos da altura de reflexão durante a ocorrência das explosões são: para a explosão X4.4, 14km para 35kHz e 12km para 45kHz; para a explosão M2.1, 9km para 35kHz e 6km para 45kHz.

Todos os resultados que serão apresentados de agora em diante baseiam-se nos dois tipos de medidas: dados da ionossonda em 35 e 45kHz e dados de VLF de longa distância em 16kHz.

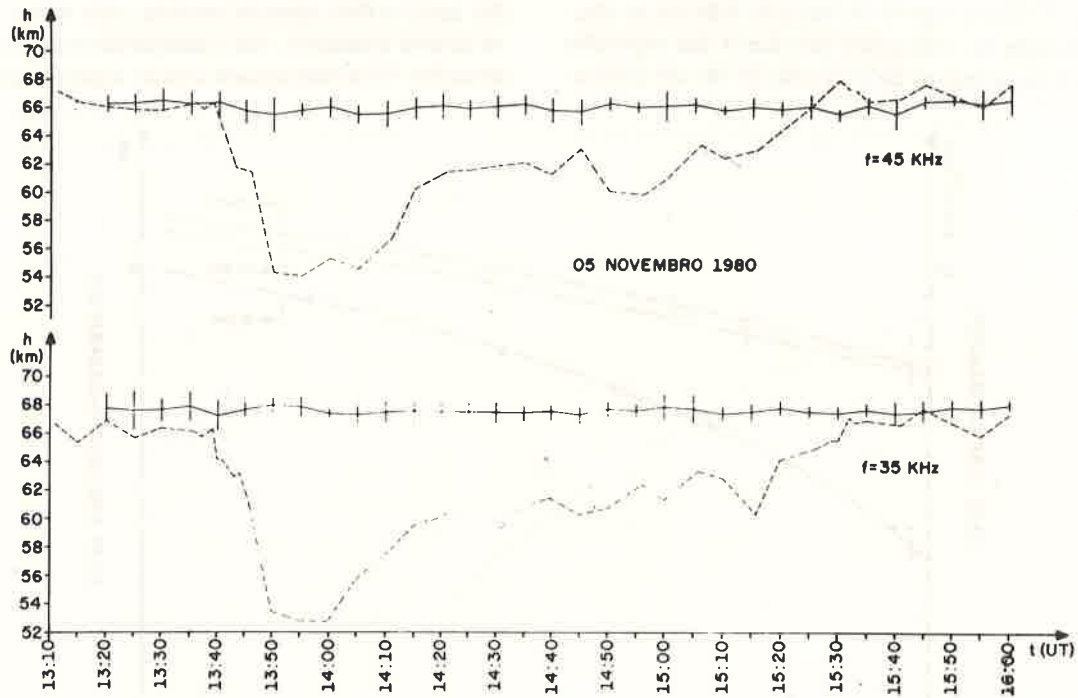


Figura 2a — Altura média da ionosfera (linha contínua) com os respectivos desvios e altura durante a ocorrência de uma explosão X4.4 em 05 Nov 80 (linha pontilhada), obtidas com dados da ionossonda oblíqua.

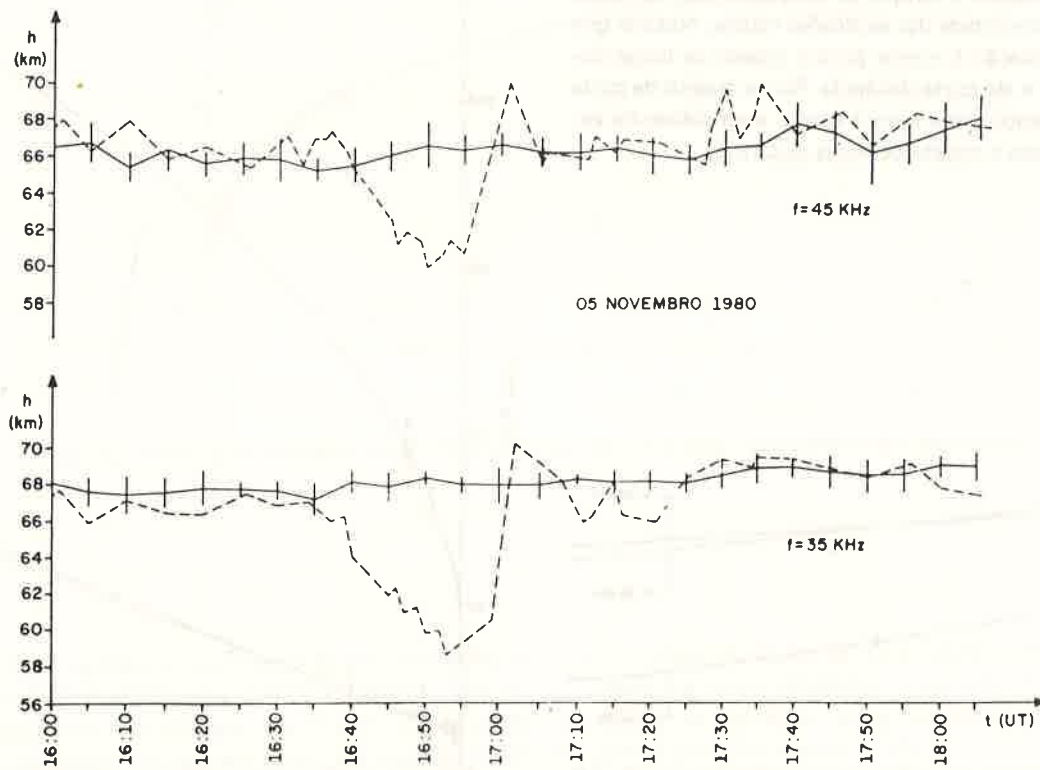


Figura 2b — Altura média da ionosfera (linha contínua) com os respectivos desvios e altura durante a ocorrência de uma explosão M2.1 em 05 Nov 80 (linha pontilhada), obtidas com dados da ionossonda oblíqua.

A Fig. 3 mostra o perfil de variação máxima de altura ( $\Delta h$ ) em função da intensidade em raios-X das explosões solares. Como os processos de obtenção de  $\Delta h$  são diferen-

tes para os dois tipos de medidas, não foram considerados os valores absolutos, mas o comportamento dos perfis apresentados. As curvas seguem uma lei logarítmica.

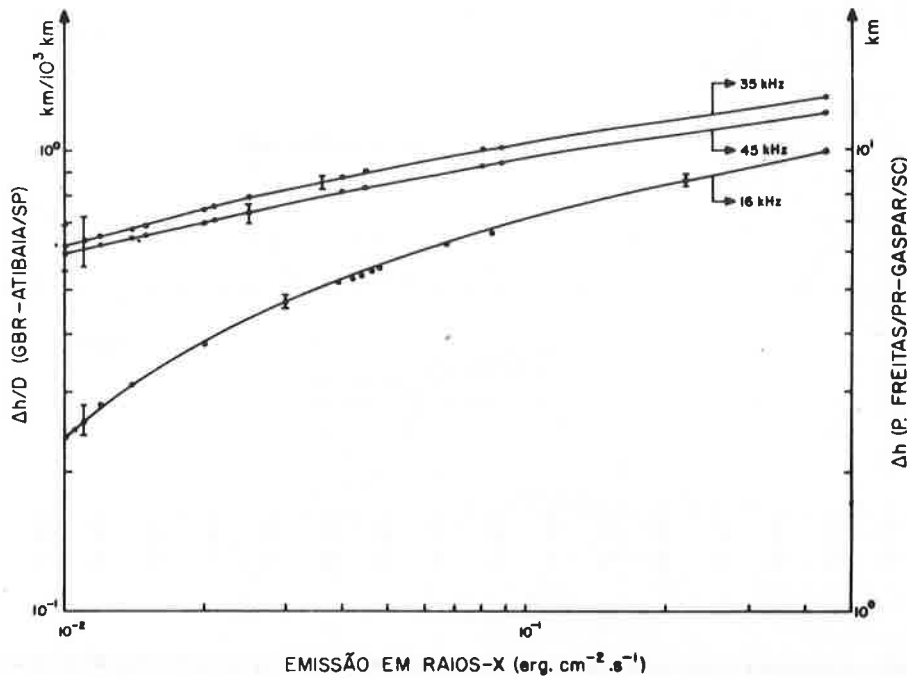


Figura 3 — Perfis de variação de altura obtidos com os dados da ionossonda oblíqua e de VLF de longa distância em função da intensidade máxima em raios-X das explosões solares.

A Fig. 4 mostra o tempo de ionização ( $\Delta t_I$ ) variando em função da intensidade das explosões solares. Nota-se que o tempo de ionização é menor para o trajeto de longa distância que para o de curta distância. Para o trajeto de curta distância esse tempo varia menos com a intensidade da explosão do que para o trajeto de longa distância.

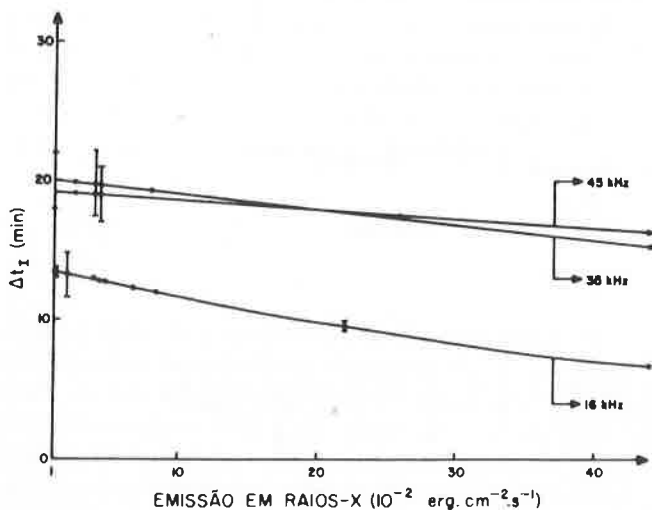


Figura 4 — Tempo de ionização ( $\Delta t_I$ ) em função da intensidade máxima em raios-X das explosões solares.

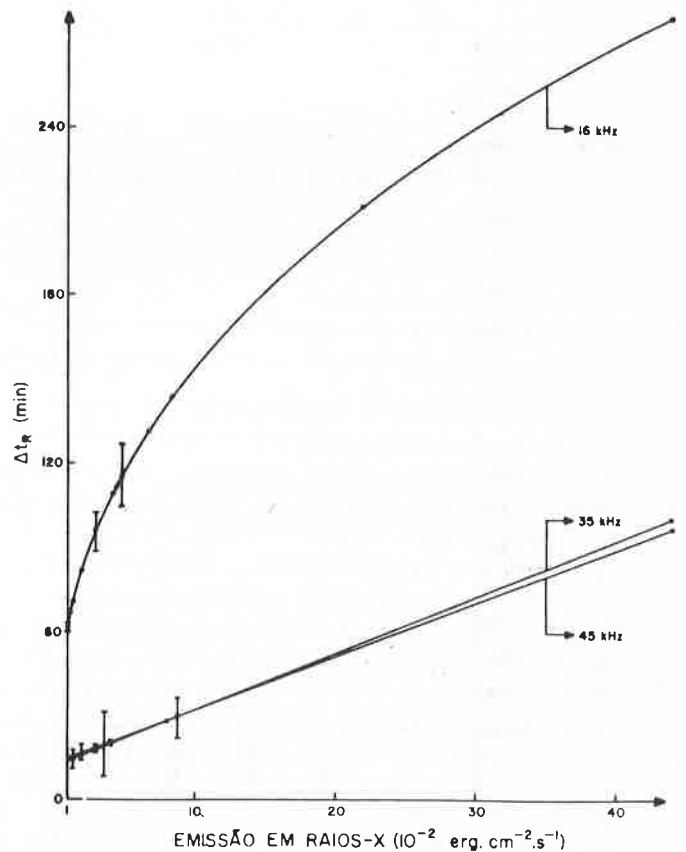


Figura 5 — Tempo de recuperação ( $\Delta t_R$ ) em função da intensidade máxima em raios-X das explosões solares.

A Fig. 5 mostra o tempo de recuperação ( $\Delta t_R$ ) em função da intensidade das explosões. Os abaixamentos da ionosfera detetados no trajeto de longa distância apresentam uma recuperação mais lenta do que os detetados no trajeto de curta distância (em média  $\sim 1,5$  horas).

A duração total do efeito das explosões solares ( $\Delta t_T$ ) em função da intensidade das mesmas é mostrado na Figura 6. Para o trajeto de longa distância a duração do evento aumenta mais acentuadamente com o aumento da intensidade da explosão do que para o trajeto de curta distância.

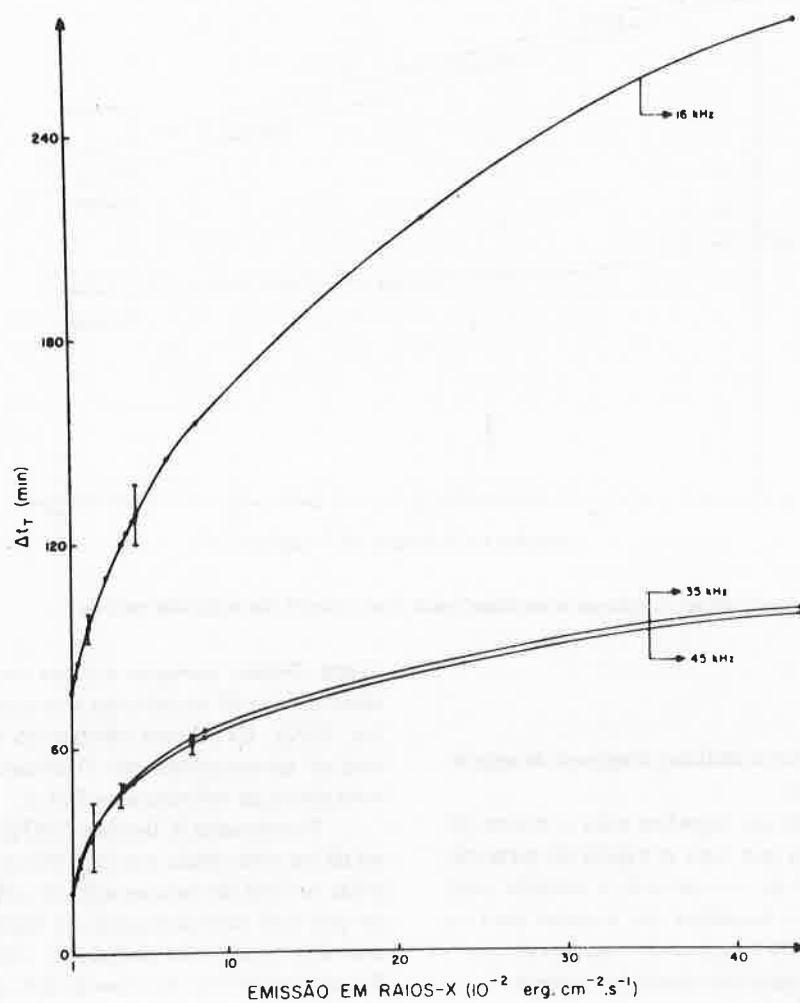


Figura 6 — Tempo total do efeito das explosões solares ( $\Delta t_T$ ) em função da intensidade máxima em raios-X das mesmas.

A Fig. 7 mostra o coeficiente de recombinação  $\alpha$ , em função da intensidade das explosões solares. Para explosões tipo M ( $10^{-2} - 10^{-1} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) os valores de  $\alpha$  obtidos tanto por ionossonda como em propagação de VLF de longa distância, são bastante próximos divergindo para eventos mais intensos. Em ambos os casos, a ordem de grandeza obtida está de acordo com o encontrado na literatura existente.

Para os dados de VLF obtidos por meio de propagação de longa distância, a variação de  $\alpha$  com a intensidade da explosão segue qualitativamente o perfil sugerido por Deshpande e Mitra (1972), para a altura de 70km, embora não apresente uma queda inicial tão rápida. Para os dados obtidos por meio de ionossonda oblíqua, as curvas médias apresentadas seguem um perfil exponencial.

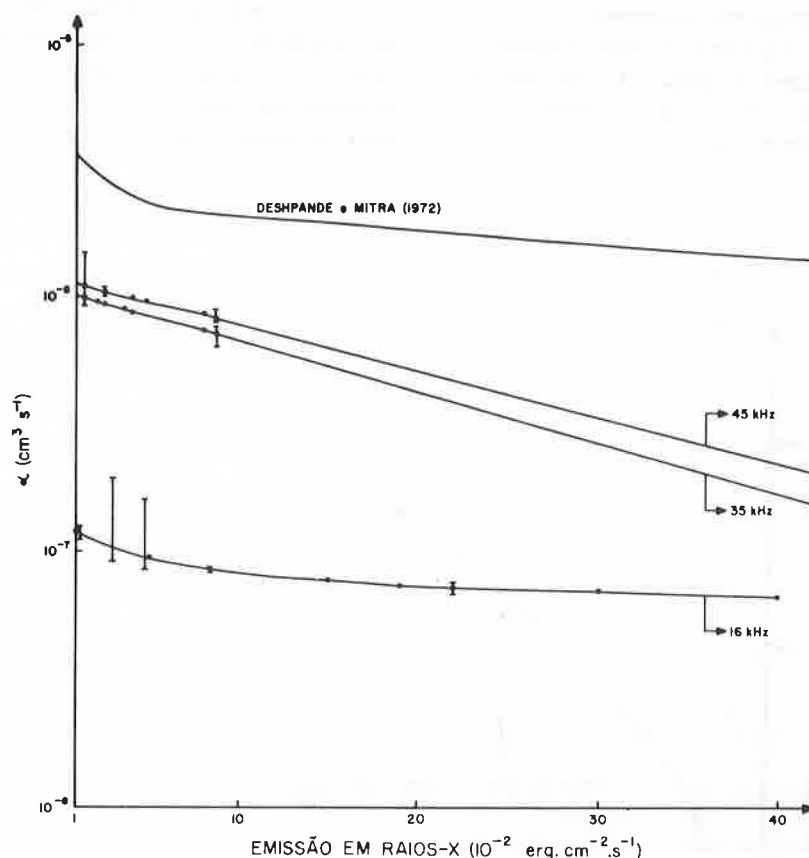


Figura 7 — Taxa de recombinação ( $\alpha$ ) em função da intensidade máxima em raios-X das explosões solares.

## CONCLUSÕES

Da análise dos resultados obtidos chegou-se às seguintes conclusões preliminares:

O tempo de ionização da ionosfera para o trajeto de longa distância é menor do que para o trajeto de curta distância, enquanto o tempo de recuperação e duração total do efeito das explosões na ionosfera são maiores para os dados obtidos no trajeto de longa distância, aumentando com o aumento da intensidade das explosões solares.

Os valores de  $\alpha$  ( $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ ) determinados com os dados obtidos através das duas técnicas descritas em função do fluxo de raios-X  $\Phi$  ( $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) na faixa de 1-8Å, mostraram um comportamento distinto para cada técnica uti-

lizada. Destes, somente a curva obtida para 16.0kHz apresenta um perfil semelhante ao encontrado na literatura (Mitra, 1972). Os valores obtidos no entanto são menores do que os apresentados por Deshpande e Mitra (1972) para uma altura de referência de 70km.

Montbriand & Belrose (1972), sugeriram que uma taxa de recombinação menor a 65km do que a 70km, encontrada na fase de recuperação de um evento de explosão solar por eles analisada pode ser explicada por diferenças na química desses dois campos de alturas. No presente trabalho têm-se alturas de reflexão diferentes para as frequências de 16kHz (VLF de longa distância) e 35-45kHz (ionossonda). As diferenças de taxa de recombinação e tempo de recuperação encontradas podem ser explicadas segundo a sugestão acima citada.

## REFERÊNCIAS

- ANANTHAKRISHNAN, S., ABDU, M.A. & PIAZZA, L.R. — 1973 — D-region recombination coefficients and the short wavelength X-ray during a solar flare. *Planet. Space Sc.*, 21: 367-175.
- CHILTON, C.J., CONNER, J.P. & STEELE, F.K. — 1965 — A comparison between solar X-ray emission and VLF sudden phase anomalies. *Proc. IEEE*, 53: 2018-2026.
- CHILTON, C.J., STEELE, F.K. & NORTON, R.B. — 1963 — Very-Low-Frequency phase observations of solar flare ionization in the D-region of the ionosphere. *J. Geophys. Res.* 68: 5421-5435.
- CRAIN, C.M. — 1961 — Ionization Loss Rates Below 90 km. *J. Geophys. Res.* 66: 1117-1126.
- DESHPANDE, S.D. & MITRA, A.P. — 1972a — Ionospheric effects of solar flares -- II. The flare spectrum below 10Å deduced from satellite observations. *J. Atmospheric Terrest. Phys.* 34: 229-242.
- KAUFMANN, P. & PAES DE BARROS, M.H. — 1969 — Some relationships between solar X-ray bursts and SPA's produced on VLF propagation in the lower ionosphere. *Solar Phys.* 9: 478-486.
- KAUFMANN, P. & MENDES, A.M. — 1970 — Relative changes on lower ionosphere conductivity gradients during SID events. *J. Geophys. Res.* 73: 2487.

- KAUFMANN, P., SCHAAL, R.E., LOPES, W. & ARAKAKI, L. — 1967 — V.L.F. propagation across the geomagnetic anomaly during SIDs. *J. Atmosph. Terr. Phys.* **29**: 1443-1451.
- LEWIS, E.A., RASMUSSEN, J.E. & KOSSEY, P.A. — 1973 — Measurements of ionospheric reflectivity from 6 to 35 kHz. *J. Geophys. Res.* **78**: 3903-3911.
- MITRA, A.P. — 1974 — Ionospheric effects of solar flares. *Astrophys. and Space Science Library*, **46**, 165-169 D. Reidel Publish. Comp. DORDRECHT — Holland, Boston — U.S.A.
- MONTBRIAND, L.E. & BELROSE, J.S. — 1972 — Effective electron loss rates in the lower D-region during the decay of solar X-ray flare events. *Radio Sci.* **7**: 133-142.
- NICOLET, M. & AIKIN, A.C. — 1960 — The formation of D-region of the ionosphere. *J. Geophys. Res.* **65**: 1469-1483.
- WAIT, J.R. & SPIES, K.P. — 1964 — Characteristics of the earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves. N.B.S. TECH. NOTE, 300.
- WHITTEN, R.C., POPPOFF, I.G., EDMONDS, R.S. & BERNING W. W. — 1965 — Effective recombination coefficients in the lower ionosphere. *J. Geophys. Res.* **70**: 1737-1742.
- Preliminary Report and Forecast of Solar Geophysical Data nº 226-330, US Department of Commerce, Boulder, Colo., 1980-1981.