



Detecção de TIDs nas regiões sub-auroral e da Anomalia Magnética do Atlântico Sul

Christiano Garnett Marques Brum; Mangalathayil Ali Abdu; Inez Staciari Batista e Fábio Augusto Vargas. INPE, Brazil.

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

Gravity waves propagating to thermospheric heights and interacting with the ionospheric plasma give rise to Traveling Ionospheric Disturbances (TID). These are visible as amplitude, phase and frequency (period) quasi-periodical fluctuations of a radio signal reflected from the ionosphere and/or a variation of cosmic noise absorption intensity in the lower ionosphere. This work presents a gravity wave study obtained from cosmic noise absorption recorded by riometer from 1989 to 1996 in the Brazilian Antarctic Station (EACF) (sub-auroral region – 62.56°S; 58.39°W) and the South Atlantic Magnetic Anomaly Region (SAMA) (Cachoeira Paulista – 22.50°S; 45.00°W). The results obtained present the occurrence dominance of the median scale TIDs in the sub-auroral region while in the SAMA region the large scale TIDs occurrence were dominant. This analysis also shows that the sub-auroral region is more prone to occurrence of TIDs than the SAMA region, independent of its period. The results show a close relationship of the medium scale TID occurrence increase with the geomagnetic activity and with the Dst index decrease (periods of the magnetic storms and sub storms) in the sub-auroral region and in the interplanetary shock periods (positive phase of the magnetic storms). In the SAMA region it was found a possible response to the large scale TIDs with the periods associated with magnetic storms and/or sub-storms.

Resumo

Este trabalho apresenta o estudo de ondas de gravidade, propagantes aqui denominadas de *Travelling Ionospheric Disturbances* (TID), obtidas da análise de 8 anos (1989-1996) de registros de riômetros de absorção ionosférica do ruído cósmico nas regiões sub-auroral (Estação Antártica Comandante Ferraz – 62.56°S; 58.39°W) e da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (SAMA) (Cachoeira Paulista – 22.50°S; 45.00°W). Os resultados obtidos apresentam a dominância de ocorrências de TIDs de média escala na região sub-auroral enquanto que na região da SAMA verificou-se uma maior ocorrência de TIDs de larga escala. Esta análise mostra que a região sub-auroral está mais sujeita ao aparecimento de TIDs, independente do seu período. Os resultados mostram uma íntima relação do aumento de ocorrências de TIDs de média escala com a atividade geomagnética e a queda do índice dst (períodos propícios a tempestades magnéticas e sub-tempestades) na região sub-auroral e

aos períodos propícios a ondas de choques (fase positiva das tempestades magnéticas). Já a região da SAMA apresentou uma possível resposta da ocorrência de TIDs de larga escala com períodos propícios a tempestades magnéticas e/ou sub-tempestades.

Introdução

Travelling ionospheric disturbances (TIDs) são perturbações que ocorrem na ionosfera como resposta do meio ionizado embebido no gás neutro o qual está sujeito à oscilações causadas pela passagem de ondas de gravidade. Estas ondas, por sua vez, são geradas devido às diferenças de pressão geradas por aquecimentos anisotrópicos da atmosfera neutra e pela força de gravidade. A ação exercida por uma onda de gravidade sobre a atmosfera neutra é transportada para a ionosfera através do arrasto iônico, visto que o movimento dos íons está acoplado ao campo de ventos do meio.

Ao se propagarem na ionosfera, as ondas de gravidade afetam a velocidade do plasma ionosférico, temperatura (iônica, eletrônica e do gás neutro), densidade e pressão (Clark et al., 1970). Além disso, as ondas de gravidade representam um importante mecanismo de dissipação de energia contida na atmosfera, nela injetada durante tempestades magnéticas. Portanto, devido ao grande espectro de interação entre os TIDs e o meio em que se propaga, várias técnicas e assinaturas das mesmas podem ser utilizadas para a detecção destas anomalias oscilatórias.

A resposta característica da passagem de uma onda de gravidade pela ionosfera nos dados de riômetros apresenta-se como oscilações periódicas nos registros da absorção ionosférica do ruído cósmico (ICNA). A variação da ICNA, por sua vez, é proporcional à variação do produto escalar entre a densidade eletrônica e a frequência de colisões do meio. Assim sendo, presume-se que os TIDs, para serem detectados por este tipo de instrumento, devem perturbar o plasma imerso na região que está sendo observada. Em condições ionosféricas consideradas normais, 95 % da absorção ionosférica a uma frequência de 30MHz ocorre em altitudes de aproximadamente 78±10 km e 71±10 km para as regiões de Cachoeira Paulista e da Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF), respectivamente (valor obtido através de simulações computacionais, Figura 1 (Brum, 2004)). Deste modo, pequenas oscilações propagantes nesta região são mais facilmente detectadas do que em outras altitudes, independentemente de sua amplitude. Uma parte significativa da absorção ionosférica do ruído cósmico poderá ocorrer na camada F da ionosfera quando a densidade eletrônica desta camada variar bastante, principalmente nas regiões de latitudes menores e durante períodos de tempestades magnéticas e/ou sub-tempestades (Brum, 2004).

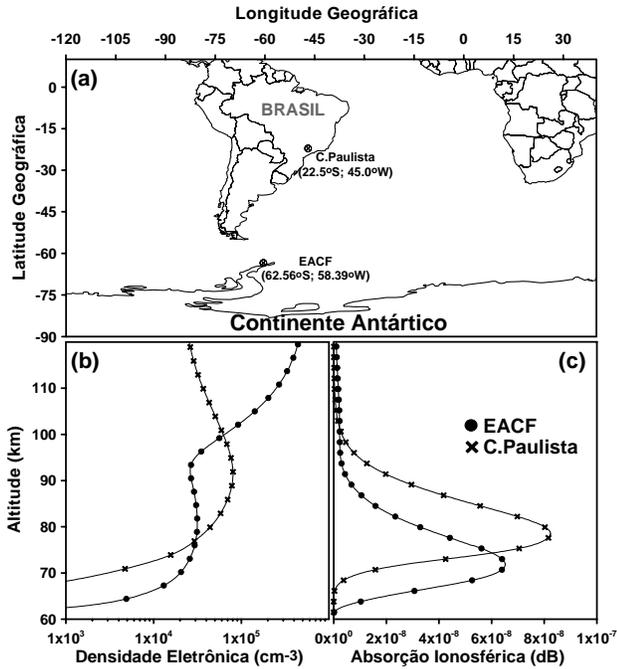


Figura 1 - (a) Localização dos sítios de observação; (b) Perfis de densidade eletrônica obtidos através de simulações numéricas para a regiões da SAMA (Cachoeira Paulista) e sub-auroral (EACF) para condições consideradas geomagneticamente calmas e; (c) cálculo das respectivas ICNA a freqüência de 30 MHz.

A baixa ionosfera é predominantemente regida pelo balanço químico entre os íons positivos e negativos imersos na atmosfera neutra. O balanceamento químico está diretamente relacionado à densidade do meio pela concentração molecular e atômica dos seus constituintes. Deste modo, as variações de densidade na atmosfera neutra causadas pela passagem de uma onda de gravidade acarretam em uma imediata variação da densidade eletrônica-iônica local e consequentemente na variação da ICNA.

A dependência da concentração eletrônica da baixa ionosfera com a densidade da atmosfera neutra também pode ser associada às taxas de produção de fotoionização e as taxas de fotoabsorção. Sabendo-se que a taxa de produção iônica por fotoionização de um determinado íon é dada por $q_i = n_i \sigma_i' \phi_\infty(\lambda) e^{-\tau}$ e supondo-se que a seção transversal de fotoionização (σ_i') e o fluxo de radiação ($\phi_\infty(\lambda)$) sejam constantes, é evidente a susceptibilidade direta deste processo com as variações de concentração do constituinte (n_i). Um complemento a esta variação da densidade eletrônica associada à densidade do meio também é relacionado ao cálculo da profundidade óptica (τ), a qual é diretamente proporcional às variações aqui discutidas por $\tau_i = \sum n_j H_j \sigma_j' \sec \chi$ (onde χ é o ângulo zenital). Ou seja, considerando-se um sistema estacionário e isotérmico, onde a altura de escala do constituinte (H_j) possa ser considerada constante em uma determinada altitude em função do tempo, e da mesma forma a seção

transversal de fotoabsorção (σ_i'), a profundidade óptica torna-se diretamente proporcional às variações de concentração do constituinte i ocasionadas pela passagem de uma onda de gravidade.

Referindo-se ainda às considerações de variações de densidade da atmosfera neutra na região da baixa ionosfera, as ondas de gravidade afetam a interação entre o fluxo incidente de partículas energéticas (raios cósmicos solares e galácticos) e a sua deposição e interação com a atmosfera neutra, atribuindo deste modo a conseqüente variação na taxa de ionização pela precipitação de partículas energéticas. Partindo da equação simplificada dada por Velinov (1968), a qual descreve a taxa de produção de pares de íons para a baixa ionosfera pelos raios cósmicos por $q(h, \lambda_m) = q_0(\lambda_m) \rho(h) \rho_0^{-1}$ (onde $q_0(\lambda_m)$ é a produção eletrônica normalizada para uma certa região atmosférica localizada na latitude (λ_m), $\rho(h)$ a densidade atmosférica em uma determinada altitude (h) e ρ_0 a densidade atmosférica ao nível do mar) é possível notar a importância do termo relacionado à densidade atmosférica na produção de pares de íons por raios cósmicos, e deste modo, estar suscetível à interferência causada pela passagem de uma onda de gravidade.

A temperatura pode atuar na variação da absorção do ruído cósmico como um catalisador nas taxas de produção e perda iônica da baixa ionosfera. Muitas reações químicas de produção e perda iônica tornam-se mais rápidas com o aumento de temperatura, por exemplo (processo inverso, menor temperatura - reação mais lenta, também é válido). Portanto, conclui-se que as variações de temperatura ocasionadas pela passagem de um TID têm grande influência nos processos químicos da baixa ionosfera.

Método de Detecção dos TIDs

Procuraram-se registros de riômetros, classificados como TIDs, àqueles que apresentassem porções de oscilações de ICNA menores que 12 horas. Os registros selecionados foram submetidos a uma análise espectral empregando-se a técnica de Análise de Fourier para Séries Finitas (Jenkins e Watts, 1968). Para tal, empregou-se a técnica do cálculo da ICNA relativa, na qual estipula-se como curva de referência a curva criada a partir de uma função pré-estabelecida a qual cruza, por interpolação, os horários inicial e final do período selecionado (painel a da Figura 2). A perturbação oscilatória foi então submetida a uma análise espectral, que teve o objetivo de encontrar os períodos dominantes de cada distúrbio selecionado. Para tal, através da análise do espectro de potência resultante desta interação (painel b da Figura 2), selecionam-se os 4 harmônicos de maiores potências, e estes por sua vez foram ordenados do maior para o menor período. Deste modo se obteve os períodos dominantes da onda. No painel c da Figura 2 são apresentadas as curvas criadas com os parâmetros associados aos harmônicos selecionados e a somatória dos mesmos. Note que a somatória das curvas criadas por este processo descreve de maneira bem próxima o comportamento da curva original do distúrbio, validando, deste modo, o processo escolhido.

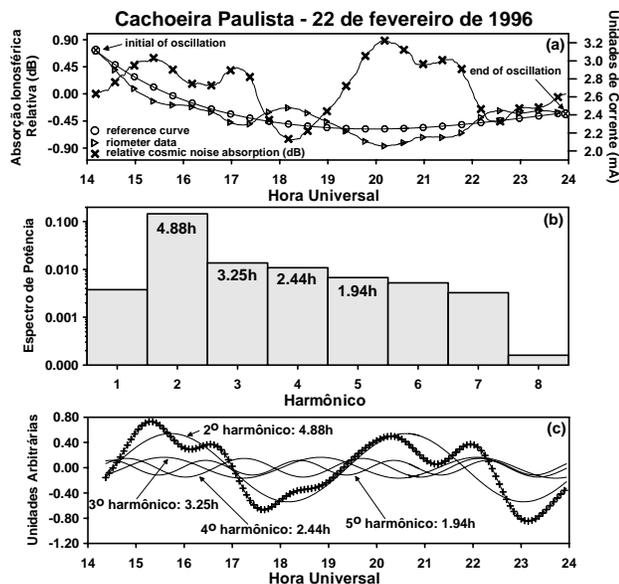


Figura 2 – Exemplo de seleção dos períodos mais expressivos contidos nos eventos oscilatórios analisados.

Resultados

Os TIDs podem ser classificados em três categorias quanto ao seu período. Neste trabalho utilizar-se-á como período dominante o maior período selecionado dos 4 melhores harmônicos obtidos, conforme descritos anteriormente. Assim sendo as ondas de gravidade ou distúrbios ionosféricos podem ser classificados quanto ao período como (Gossard e Hooke, 1975): 1) Larga escala (TIDLs) - oscilações com períodos maiores que 2 horas. Geralmente apresentam poucos ciclos e possuem um comprimento de onda de algumas centenas de quilômetros; 2) Média Escala (TIDMS) - são oscilações com períodos compreendidos entre 15 minutos e duas horas, com comprimentos de onda de algumas dezenas de quilômetros, e; 3) Pequena Escala (TIDSS) - as ondas de pequena escala são definidas como sendo aquelas superpostas às ondas de média e grande escala, podendo estas ondas terem períodos semelhantes às ondas de média e grande escala, atribuídas nas definições anteriores.

A Figura 3 apresenta a distribuição percentual de ocorrência dos períodos encontrados nos TIDs selecionados até o 3º harmônico mais relevante. O período dominante da onda nesta figura é denominado de 1º harmônico sendo os demais períodos de pequena escala como 2º e 3º harmônicos. Ainda nesta figura é apresentado o domínio do período predominante nos dois primeiros painéis da esquerda (1º harmônico) pelas curvas contínuas mais grossas. A ocorrência de ondas de gravidade de larga escala na região de menor latitude está concordante com as considerações de Abdu et al. (1981) e Abdu e Rai (1975). Entretanto as observações dos trabalhos citados são para TIDs passando pela camada F da ionosfera, o que sugere que parte dos registros de TIDs obtidos sejam de regiões ionosféricas mais altas. Esta colocação corrobora com os resultados obtidos por Brum (2004), que através da análise de 8 anos de dados de riômetros encontrou uma considerável

contribuição da região F na ICNA, principalmente durante períodos geomagneticamente perturbados e períodos sujeitos a tempestades magnéticas e/ou sub-tempestades. A região sub-auroral apresenta uma pequena dominância das ondas de media escala, porém significativa, quando comparadas as de grande escala.

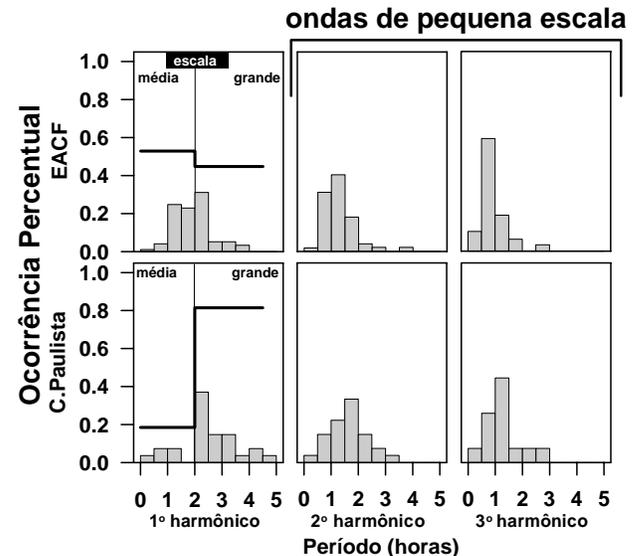


Figura 3 – Distribuição percentual de ocorrência dos períodos encontrados nos TIDs até o 3º harmônico mais relevante para as regiões da SAMA (C.Paulista) e sub-auroral (EACF).

Os painéis (a.a) e (a.b) da Figura 4 apresentam as ocorrências individuais dos TIDs registrados em função da somatória diária dos respectivos índices Kp das localidades em estudo. Já os painéis (b.a) e (b.b) desta mesma figura apresentam os mesmos TIDs, porém confrontados com a média diária do índice dst. Nesta mesma figura são apresentadas as ocorrências parametrizadas dos TIDs durante o período em análise. Esta parametrização dá-se pelo quociente do número de ocorrências de TIDs pelo o número de dias contidos na faixa da somatória do índice kp ou dst escolhido de todo o período em análise.

A ocorrência dos TIDs analisados neste trabalho em função da atividade geomagnética aproxima-se das afirmações de Testud (1970), que diz ser necessário uma condição geomagnética expressa pela somatória diária dos índices Kp maior que 16 para que haja a ocorrência de TIDs, principalmente as de larga escala (21 dos 32 TIDs de larga escala registrados encontram-se acima da somatória diária de Kp igual a 16 na região da EACF, enquanto que na região da AMAS esta proporção está de 16 para 21 TIDs).

Através da análise das ocorrências parametrizadas constata-se que durante períodos de atividade geomagnética mais perturbado há um maior número ocorrências de TIDs de média escala na região da EACF, enquanto que o máximo de ocorrências de TIDs de grande escala está localizada na faixa de 18-30 kp. A região da SAMA apresenta uma predominância de TIDs de larga escala, independente da atividade

geomagnética. Nota-se também que nesta região há uma boa distribuição de ocorrências de TIDs com as faixas do índice kp, podendo-se excluir deste modo à atividade geomagnética como fator de atenuação ou de geração de ondas de gravidade na região da SAMA. Verifica-se também que há um número aproximadamente 11 vezes maior de ocorrências de TIDMSs na região sub-auroral do que na região da SAMA, sugerindo TIDMSs geradas na região da EACF dificilmente conseguem se propagar até a região de latitudes mais baixas. Entretanto, o número de TIDLs registrados nas duas regiões em estudo são mais próximas, 22 e 15 ocorrências para as regiões sub-auroral e da AMAS, respectivamente, sugerindo que os TIDLs conseguem se propagar mais facilmente das regiões aurorais para as regiões de menores latitudes.

O comportamento da ocorrência parametrizada e do período das TIDs em função do índice dst são apresentados nos painéis (b.a) e (b.b) da Figura 4. Avaliando a ocorrência parametrizada, constata-se que há um aumento de ocorrências de TIDs de média escala com a queda do índice dst, somente na fase negativa, e uma ocorrência significativa na fase positiva. As TIDLs estão mais bem distribuídas em função do índice dst nos registros da EACF, com um ligeiro aumento de ocorrências com a queda dos valores de dst. Basicamente verifica-se uma aumento de ocorrências de TIDLs com a queda do índice dst na região da SAMA. Assumindo a classificação de tempestades magnéticas propostas por Gonzalez et al (1994), os resultados apresentados estão de acordo com os trabalhos de Hines (1960, 1963 e 1968) estendidos por Georges (1968), Francis (1973, 1974), Hooke (1968) que relacionaram fenômenos de distúrbios ionosféricos propagantes de larga escala com sub-tempestades magnéticas (Testud, 1970). Estas ondas de gravidade seriam geradas pelas partículas energéticas capturadas pelo campo magnético durante tempestades e sub-tempestades magnéticas as quais passam a ter energias suficientemente altas para penetrarem na atmosfera e atingirem alturas tais que a interação com a atmosfera neutra se intensifica. Com isso, a alta atmosfera de altas latitudes é mais aquecida, dando origem a ventos termosféricos perturbados e ocasionalmente dando origem a ondas de gravidade. Estas ondas de gravidade, principalmente as de larga escala, se propagariam deste modo para as regiões de baixas latitudes seguindo as linhas de campo geomagnética.

conclusões

Os resultados obtidos neste trabalho apresentam a dominância de ocorrências de TIDs de média escala na região sub-auroral enquanto que na região da SAMA há uma maior ocorrência de TIDs de larga escala. Observou-se também que a região da EACF (mais próxima ao pólo) está mais sujeita a ocorrências de TIDs do que a região da SAMA, independente do período destas ondas de gravidade. Tal fato sugere que nem todas as ondas de gravidade formadas nas regiões próximas aos pólos conseguem se propagar para regiões de baixas latitudes, principalmente as ondas de média escala.

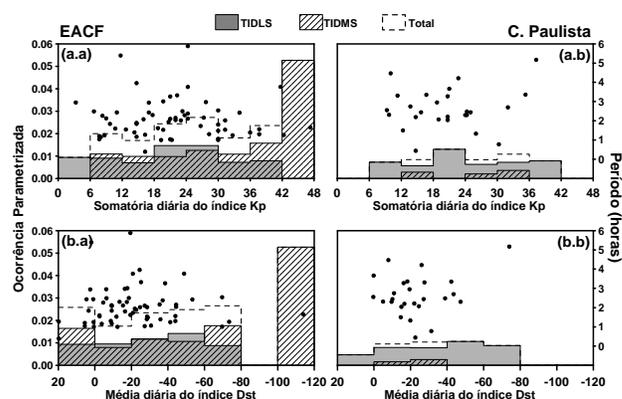


Figura 4 – (a.a e a.b) Períodos dos TIDs registrados nas regiões da SAMA e sub-auroral em função das respectivas somatórias diárias dos índices Kp, e; (b.a e b.b) Períodos dos TIDs registrados nas regiões da SAMA e sub-auroral em função das respectivas médias diárias dos índices dst e ocorrência parametrizada das mesmas.

Através da análise de ocorrência de TIDs e da atividade geomagnética, verificou-se que durante os períodos mais perturbados há uma maior probabilidade de ocorrências de TIDs de média escala na região da EACF. Tal fato não é verificado nas ocorrências de TIDs de larga escala, as quais mostraram-se mais bem distribuídas com a atividade geomagnética, o que sugere que a atividade geomagnética não está diretamente relacionada a ocorrência de TIDs de larga escala. Esta última afirmação pode ser atribuída às ocorrências das TIDs de larga escala da região da SAMA.

A maior ocorrência de TIDLs e TIDMSs em períodos propícios a tempestades magnéticas e subtempestades em ambas as estações pode estar associado à penetração de partículas energéticas nas regiões de altas latitudes, as quais gerariam um aquecimento da atmosfera neutra local, dando origem a ventos termosféricos perturbados e ocasionalmente dando origem a ondas de gravidade que se propagariam para as regiões de latitudes menores. Verifica-se também através desta análise que durante períodos propícios a ondas de choques magnetosféricas (dst positivo) há uma ocorrência significativa de TIDMSs na região sub-auroral, as quais podem estar associadas também à penetração de partículas energéticas magnetosféricas durante a fase positiva de tempestades magnéticas.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a Fundação de Ampara a Pesquisa do Estado de São Paulo (projeto nº:04/07695-5), Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (SECIRM), Conselho Nacional de desenvolvimento Científico (CNPq)

Referências Bibliográficas

Abdu, M.A. ; Batista, I.S.; Piazza, L.R.; Massambani, O. Magnetic storm associated enhanced particle precipitation in the South Atlantic Anomaly. Evidence from VLF phase measurement. Journal of Geophysical Research, v.86, n.A9, p.7533-7542, 1981.

- Abdu, M.A.; Rai, D.B.** Gravity waves in low latitude F-region. *Planetary and Space Science*, v.23, n.3, p.487-491, 1975.
- Brum, C.G.M.** , 2004. Variability of cosmic noise absorption by riometer and modeling of the associated processes, Thesis (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE), Brazil, 2004. (portuguese)
- Clark, R.M.; Y2h, K.C. and Liu, C.H.** Gravity waves in the ionosphere. Technical Report. National Science Foundation, Ionospheric radio Laboratory, 1970.
- Francis, S.H.** Lower-atmospheric gravity modes and their relation to medium-scale traveling ionospheric disturbances. *Journal of Geophysical Research*, v. 34, n.3, p.8289-8295, 1973.
- Francis, S.H.** Global propagation of atmospheric gravity waves. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v.37, p.1011-1044, 1975.
- Georges, T.M.** Doppler studies of traveling ionospheric disturbances. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v.30, p.735-746, 1968.
- Gonzalez-Alarcon, W. D.; Joselyn, J. A.; Kamide, Y.; Kroehl, H. W.; Rostoker, G.; Tsurutani, B. T.; Vasyliunas, V. M.** What is a geomagnetic storm? *Journal of Geophysical Research*, v. 99, n.4, p.5771-5792, 1994.
- Gossard, E. E.; Hooke, W. H.** *Waves in the atmosphere.* New York. Elsevier Scientific Publishing Company, 1975.
- Hines, C.O.** Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. *Canadian Journal of Physics*, v.38, p. 1441, 1960.
- Hines, C.O.** The upper atmosphere in motion. *Journal R. Meteorological Society*, v89, 1-42, 1963.
- Hines, C.O.** An effect of ohmic losses in upper atmospheric gravity waves. *Journal of Geophysical Research*, v.30, p.851-856, 1968.
- Hook, W.H.** Ionospheric irregularities produced by internal atmospheric gravity waves. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v.30, p.795-823, 1968.
- Jenkins, G.M.; Watts, D.G.** *Spectral analysis and its application.* San Francisco: Holden-Day Inc., 1968. 525 p.
- Testud, J.** Gravity Waves Generated During Magnetic Substorms. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v.32, n.11, p.1793-1805, 1970.
- Velinov, P.** On ionization in the Ionosphere D-region by galactic and Solar Cosmic Ray. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v.30, n.11, p.1891-1905, 1968.