

Identificação de traços ionosféricos em ionogramas para ionossondas localizadas em baixas latitudes e região equatorial utilizando lógica nebulosa

Valdir Gil Pillat^{1,2}, Lamartine Nogueira Frutuoso Guimarães^{2,3}

¹Laboratório de Física e Astronomia - LFA
Universidade do Vale do Paraíba - UNIVAP

²Programa de Doutorado em Computação Aplicada – CAP
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

³Divisão de Energia Nuclear – ENU
Instituto de Estudos Avançados – IEAv

valdirgp@univap.br, guimarae@ieav.cta.br

Abstract. *The purpose of this work is to present a new computational tool for ionogram generated with a Canadian Advanced Digital Ionosonde (CADI). This new tool uses the fuzzy relation paradigm to identify the F trace and from this form extract the parameters foF2, h'F, and hpF2. The tool was very extensively tested with ionosondes that operate at low latitudes and near the equatorial region. The ionograms used in this work were recorded at São José dos Campos (23.2° S, 45.9° W; dip latitude 17.6° S) and Palmas (10.2° S, 48.2° W; dip latitude 5.5° S). These automatically extracted ionospheric parameters were compared with those obtained manually and a good agreement was found. The developed tool will greatly expedite and standardize ionogram processing. Therefore, this new tool will facilitate exchange of information among many groups that operate ionosondes of the CADI type, and will be very helpful for space weather purposes.*

Resumo. *O objetivo deste trabalho é apresentar uma nova ferramenta computacional para análise de ionogramas da ionossonda Canadian Advanced Digital Ionosonde (CADI). A ferramenta utiliza a técnica de relação nebulosa para identificar o traço da região F da ionosfera e dessa forma extrair os parâmetros foF2, h'F e hpF2. A ferramenta foi extensivamente testada para ionossondas que operam em baixas latitudes e próxima da região equatorial. Nesse trabalho foram utilizados ionogramas obtidos em São José dos Campos (23.2° S, 45.9° O; dip latitude 17.6° S) e Palmas (10.2° S, 48.2° O; dip latitude 6.6° S). Os parâmetros ionosféricos extraídos automaticamente são comparados com aqueles obtidos manualmente e foi encontrada uma boa concordância. A ferramenta desenvolvida será de grande utilidade para agilizar e padronizar o processamento de ionogramas e, portanto facilitar estudos relacionados com o clima espacial realizados por vários grupos que operam ionossondas do tipo CADI.*

Palavras-chave: *lógica nebulosa, inteligência artificial, relação nebulosa, ionosfera, ionograma*

1. Introdução

A atmosfera terrestre é formada por átomos, moléculas neutras, moléculas ionizadas e elétrons livres. De acordo com o perfil vertical de temperatura a atmosfera neutra pode ser subdividida em troposfera [0-15 km], estratosfera [15-50 km], mesosfera [50-80 km] e termosfera [80-650 km] e de acordo com a densidade eletrônica a atmosfera ionizada (ionosfera) é subdividida em região D [70-90 km], região E [90-150 km] e região F [150-1000 km] que pode se dividir em duas camadas F1 e F2).

O estudo da ionosfera tornou-se ainda mais relevante na sociedade moderna devido à grande dependência que as novas tecnologias têm em relação aos satélites. Além dos satélites orbitarem principalmente em altitudes ionosféricas, as transmissões satélite-satélite e satélite-estação terrestre são realizadas por intermédio de ondas eletromagnéticas, e essas ondas interagem (refração, reflexão e absorção) com a atmosfera ionizada quando se propagam.

O estudo dessa região carregada eletronicamente, ionosfera, da atmosfera pode ser realizado utilizando equipamentos em solo, tais como: ionossondas, radares de espalhamento coerente e incoerente, GPS e equipamentos ópticos. Um dos equipamentos mais utilizados para estudar a ionosfera é um sistema de radar chamado ionossonda. As ionossondas operam na faixa de rádio frequências de 1 a 20-30 MHz. Os sinais de rádio-frequência transmitidos pela ionossonda são refletidos quando a frequência transmitida for igual à frequência natural do plasma ionosférico, ou seja, um eco retorna para a superfície da Terra. Medindo-se o tempo decorrido entre a transmissão e a recepção do sinal e assumindo-se que a onda se propaga com a velocidade da luz no vácuo, calcula-se a altura virtual onde ocorreu a reflexão.

O gráfico resultante desses ecos, quando se realiza uma varredura de frequências, é chamado de ionograma. Esse gráfico fornece um traço característico de frequência versus a altura virtual (Figura 1). Nesse traço é possível identificar a região E, e as camadas F1 e F2. Atualmente, com o advento das ionossondas digitais, é possível obter ionogramas com uma resolução temporal significativa, entre 1 e 5 minutos. A utilização de técnicas computacionais para visualizar, filtrar ruídos e extrair parâmetros ionosféricos do traço característico dos ionogramas, tornou-se uma ferramenta indispensável nessa área de pesquisa. Na realidade, a extração automática desses parâmetros é importante para manipularmos uma grande quantidade de ionogramas.

Reinisch e Huang (1982 e 1983) e Huang e Reinisch (1982) publicaram uma sequência importante de três artigos, onde mostram como utilizar o processo automático de extração de parâmetros nos ionogramas digitais. Reinisch e Huang (1982) apresentaram um algoritmo automático para identificar os traços ordinários (O) e extraordinários (X) dos ionogramas digitais. Huang e Reinisch (1982) compararam técnicas de cálculo da altura real da ionosfera, utilizando os traços O e X que foram previamente identificados em ionogramas obtidos através de satélites. Reinisch e Huang (1983) utilizaram a técnica desenvolvida anteriormente para dados de satélite e a aplicaram para ionossondas instaladas em solo. Nessa investigação foi possível identificar automaticamente a região E, e as camadas Es, F1 e F2. Estes artigos foram os precursores de outros trabalhos para se desenvolver técnicas computacionais de inteligência artificial na extração automática de parâmetros dos ionogramas.

Galkin et al (1996) implementou uma rede neural artificial do tipo Hopfield para reconhecimento dos traços O e X do ionograma e mostrou que esta técnica pode melhorar a extração automática dos parâmetros ionosféricos e perfil real de densidade

eletrônica durante períodos geomagneticamente perturbados. Tsai e Berkey (2000) implementaram uma abordagem utilizando lógica nebulosa para remover os ruídos no ionograma e em seguida extrair os parâmetros críticos para as DigisondasTM DGS-256 localizados em médias latitudes. Os ionogramas foram convertidos em imagens na escala de cinza. Essas escalas de cinza foram utilizadas como entrada para o sistema nebuloso e foram extraídos subconjuntos clássicos do conjunto nebuloso utilizando a abordagem de alfa-cut (Tsoukalas e Uhrig, 1997). Também foi utilizado o método de λ -connected para segmentar a região E, e as camadas Es, F1 e F2 no ionograma (Chen e Adjei, 2009). Na defuzzificação para extrair os valores dos parâmetros críticos foi utilizado o método do centro de áreas (COA), em que o centro de saída é o centro de gravidade da função de distribuição de possibilidade da ação de controle (Tsoukalas e Uhrig, 1997). Berkey e Sikdar (2005) utilizaram a mesma técnica utilizada em Tsai e Berkey (2000) para identificar a camada E-esporádica (Es). A camada Es pode se formar a qualquer momento. Ela ocorre normalmente na altitude entre 90 e 120 km (dentro da região E) e pode se distribuir por uma grande área ou ser confinada a uma pequena região. Pezzopane e Scotto (2007) publicaram uma ferramenta desenvolvida pelo Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, baseada na técnica de reconhecimento de imagens, e mostrou um bom desempenho comparado com o sistema da DigissondaTM, conforme apresentado em (Pezzopane e Scotto, 2007; Bullett et al, 2010).

Neste trabalho, o objetivo é desenvolver uma ferramenta utilizando o paradigma de inteligência artificial, a lógica nebulosa, para extrair parâmetros ionoféricos de ionogramas, obtidos pela ionossonda digital “Canadian Advanced Digital Ionosonde” (CADI) (Macdougall, 1995). Essas ionossondas pertencem ao Laboratório de Física e Astronomia da “Universidade do Vale do Paraíba” (UNIVAP). Atualmente, o grupo opera três ionossondas digitais localizadas em baixas latitudes: São José dos Campos (SP) e regiões próximas a região equatorial: Palmas (TO) e Manaus (AM). No entanto, a ferramenta será útil para outros grupos de pesquisa que operam ionossondas do tipo CADI (Antártica, Argentina, Rússia, Austrália, Indonésia, Índia, USA, Canadá, etc).

O algoritmo desenvolvido analisa o ionograma, obtido pela ionossonda CADI, utilizando a relação nebulosa, entre os conjuntos nebulosos definidos sobre as alturas e frequências do ionograma (Pillat e Guimarães, 2010). Em seguida extrai automaticamente os seguintes parâmetros da camada-F; a frequência crítica da camada F (f_oF2), a altura mínima do traço da camada F ($h'F$), e a altura do pico da camada F ($h_pF2=h(0,834*f_oF2)$), veja Figura 1. Os trabalhos anteriores utilizam os dados da DigissondaTM e as ferramentas desenvolvidas não foram aplicadas em ionogramas obtidos por ionossondas do tipo CADI, devido aos dados possuírem formatos diferentes.

2. Características do Algoritmo Desenvolvido

O estudo da evolução temporal da ionosfera em um determinado período, utilizando ionossondas, deve processar um conjunto grande de ionogramas. A extração dos parâmetros f_oF2 , $h'F$ e h_pF2 dos ionogramas exige a identificação do traço das regiões ionosféricas (E e F), porém no mesmo ionograma temos ruídos, segunda reflexão e algumas vezes *spread-F*. Para facilitar a extração dos parâmetros ionosféricos o Laboratório de Física e Astronomia da UNIVAP desenvolveu um programa que torna mais simples a visualização dos ionogramas e a extração desses parâmetros. Esta ferramenta computacional foi denominada “Univap Digital Ionosonde Data Analysis” (UDIDA).

A ferramenta UDIDA possui várias funcionalidades como: análise de ondas de

gravidade, ondas planetárias, iso frequências, entre outras. Tornando-a uma ferramenta computacional versátil. A principal funcionalidade do UDIDA é a redução de dados (extração dos parâmetros ionosféricos) manualmente, onde são selecionados os parâmetros ionosféricos pressionando o botão esquerdo do mouse no ionograma. Conforme o usuário pressiona o botão esquerdo do mouse um campo é preenchido (veja Figura 1). No ionograma (Figura 1) é possível observar os traços da região E e F, ruídos tipo 1 (retângulo vermelho), ruídos tipo 2 (círculo vermelhas) e segunda reflexão (elipse vermelha). Estes parâmetros são armazenados em arquivos diários. Porém, o processo manual dependente da interpretação do analista e pode gerar erros de interpretação e julgamento.

A redução de dados manual, utilizando a ferramenta UDIDA, foi utilizado no estudo da ionosfera durante períodos geomagneticamente calmos e perturbados (Becker-Guedes et al., 2004; Lima et al., 2004; Fagundes et al., 2008), estudos de propagação de ondas planetárias e ondas de gravidade (Fagundes et al., 2005; Fagundes et al., 2007; Oliveira et al., 2009) e utilização dos parâmetros críticos para analisar o comportamento da ionosfera (Muella et al., 2008, Cardoso et al., 2011; Jesus et al, 2011; Sahai et al, 2011; Bertoni et al, 2011).

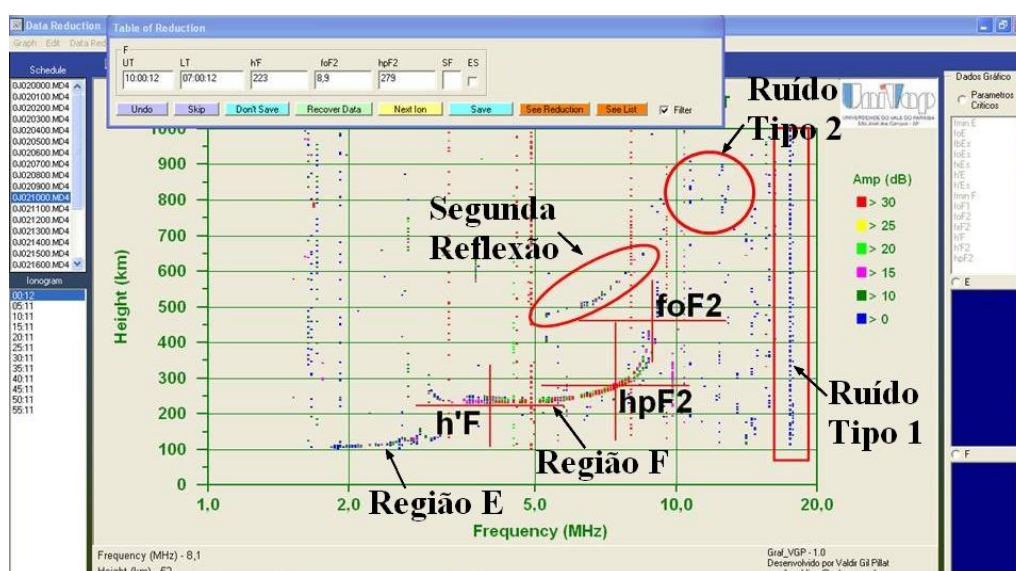


Figura 1. Exemplo de um ionograma obtido pela ionossonda digital do tipo CADI em 02/10/2000, São José dos Campos, e visualizado através do programa UDIDA. Com os parâmetros ionosféricos, os ruídos e segunda reflexão identificados.

Nesse trabalho é apresentada uma nova técnica, utilizando Inteligência Computacional (IC), de automatizar a redução de dados da ionossonda CADI. Existem algumas ferramentas semelhantes que foram desenvolvidas anteriormente, como por exemplo, o “Automatic Real-Time Ionogram Scaler with True-height” (ARTIST) para as DigisondasTM e o Autoscala para as Advanced Ionospheric Sounder – Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (AIS-INGV). A sistematização do processo de análise de dados tem o propósito de elevar a capacidade de extração dos parâmetros ionosféricos a partir dos ionogramas. Este modelo incorpora os aspectos cognitivos dos especialistas humanos.

Neste trabalho é abordado um modelo de apoio à decisão para o processo de

extração de foF2, h'F e hpF2 dos ionogramas. Este modelo foi estruturado em duas partes. A primeira parte elimina uma grande parte dos ruídos e separa os traços da camada E e F do ionograma, utilizando relação nebulosa. Na primeira parte: a) São eliminados os ruídos do tipo 1 e tipo 2 (Figura 1). b) Separam-se os ecos da região E e F. c) Identificam-se as regiões do ionograma com maior concentração de ecos oriundos do traço da camada F. d) Agrupam-se as regiões próxima dessa região com maior concentração de pontos utilizando relação nebulosa. A Figura 2 mostra a aplicação desse modelo para um ionograma obtido no período diurno 09:40 "Local Time" (LT) em São José dos Campos no dia 02 de outubro de 2000. A Figura 2a mostra o ionograma original, a Figura 2b mostra o ionograma após a eliminação do ruído tipo 1, a Figura 2c mostra o ionograma após a eliminação dos ruídos tipo 2 e a Figura 2d mostra o traço identificado pelo ajuste polinomial. Note que ainda existem alguns ruídos, mas esses ruídos não interferem na identificação do traço da camada F. A segunda parte envolve o ajuste polinomial de Gauss (Sperandio et al., 2006) sobre o traço da camada F (Figura 2d) e a extração dos parâmetros foF2, h'F e hpF2.

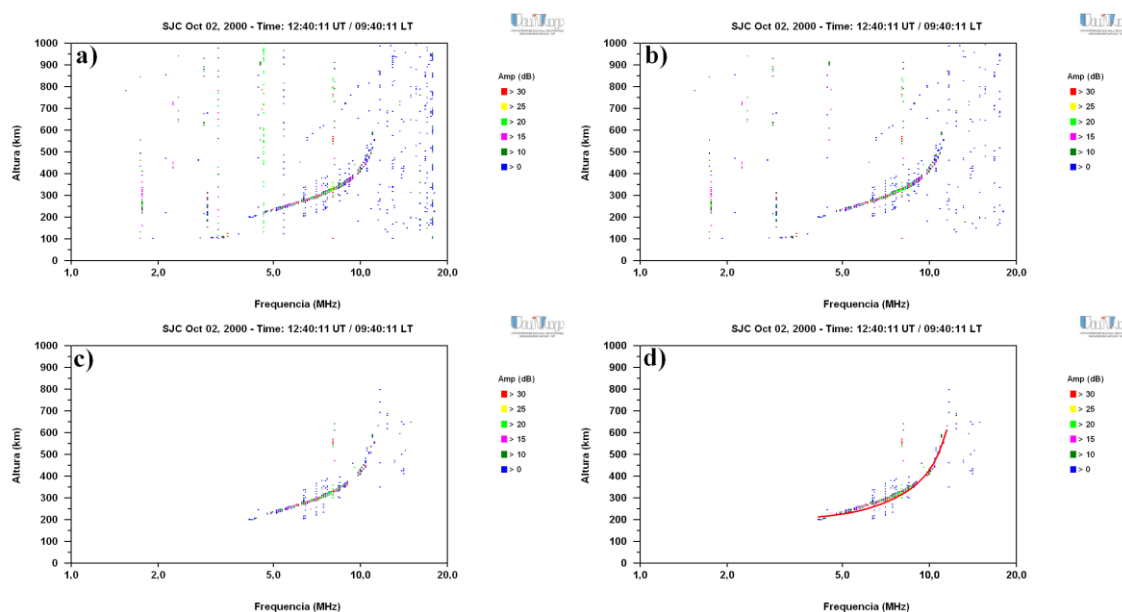


Figura 2 – Processo de identificação do traço da camada F para um ionograma obtido no período diurno. a) ionograma original. b) eliminação do ruído tipo 1. c) eliminação do ruído tipo 2. d) identificação do traço da camada F utilizando o ajuste polinomial.

A extração dos parâmetros (foF2, h'F e hpF2) é realizada individualmente. O h'F é extraído utilizando-se uma média entre os ecos que estão localizados ao redor dos primeiros pontos do polinômio. O foF2 é extraído utilizando a região final do polinômio e são analisados os ecos que se encontram próximo dessa região no ionograma. Nesse processo é analisado o traço ordinário, ou seja, o traço interno. Esse é o parâmetro mais difícil de identificar, pois as vezes ele deve ser extrapolado, já que o sensor da ionossonda não consegue observar o final do traço da camada. Por último, é extraído o parâmetro hpF2. Esse parâmetro é encontrado utilizando-se a expressão $hpF2 = h(foF2 * 0.834)$ (Piggott e Rawer, 1972). O desempenho deste algoritmo é apresentado a seguir, comparando-se os parâmetros extraídos manualmente com os parâmetros extraídos automaticamente por esse modelo.

3. Resultados

Após a identificação do traço ionosférico através do polinômio de Gauss foi possível extrair os parâmetros ionosféricos dos ionogramas. Para validar a solução encontrada pelo modelo, foram comparados os parâmetros foF2, h'F e hpF2 extraídos manualmente com os parâmetros extraídos automaticamente pelo modelo. A Figura 3 mostra essa comparação entre os parâmetros ionosféricos extraídos manualmente (linha azul) versus os extraídos automaticamente (linha vermelha), obtidos em São José dos Campos no dia 24 de agosto de 2001.

A Figura 3a mostra a comparação para o parâmetro foF2, é importante notar que a comparação é muito boa exceto durante o período diurno, quando os ionogramas apresentam uma degradação significativa. A Figura 3b mostra o resultado para o parâmetro h'F. É possível observar que o método automático fica muito próximo dos resultados obtidos manualmente durante todo o dia. A Figura 3c mostra o resultado para o parâmetro hpF2. É possível observar que para esse parâmetro o método automático se mantém próximo ao parâmetro extraído manualmente praticamente durante todo o dia, exceto no período das 07:00 às 09:00 “Universal Time” (UT), devido a erros na identificação do parâmetro foF2. A comparação entre a média diária dos parâmetros foF2, h'F e hpF2 extraídos manualmente (foF2=7.8, h'F=228 e hpF2=293) e automaticamente (foF2=7.5, h'F=239 e hpF2=298) são boas.

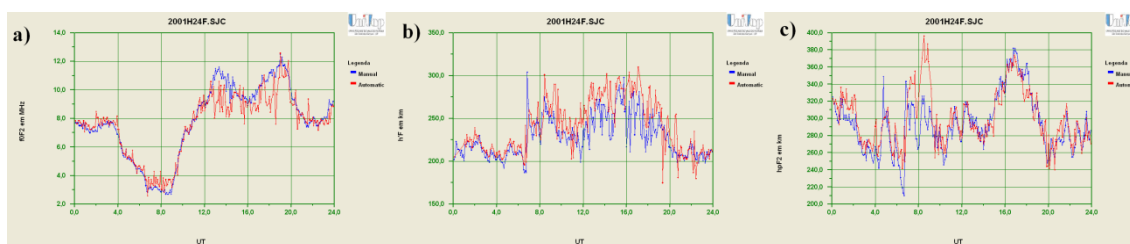


Figura 3 - Comparação entre os parâmetros foF2 (a), h'F (b) e hpF2 (c) extraídos manualmente versus automaticamente em 24/08/2001 em São José dos Campos.

Com esses resultados é possível dizer que esse modelo nessa versão pode resolver o problema de extração dos parâmetros (foF2, h'F e hpF2) automaticamente dos ionogramas obtidos por ionossondas do tipo CADI em baixas latitudes. Esse modelo ainda precisa de mais testes e ajustes para se adaptar a outros comportamentos da ionosfera, como por exemplo, em períodos geomagneticamente perturbados, pois o espalhamento no ionograma dificulta a identificação do traço ionosférico.

4. Conclusões

Neste trabalho foi possível observar que a relação nebulosa é uma ferramenta poderosa no processo de classificação do ionograma. Essa é a primeira versão do modelo e a identificação dos parâmetros foF2, h'F e hpF2 se demonstrou eficiente para um dia calmo, mas ainda precisa de alguns ajustes para se adequar às variações na dinâmica da ionosfera. No entanto, essa abordagem utilizando relação nebulosa provou ser eficiente no auxílio na busca do perfil da ionosfera, em um dia calmo. Algumas atividades futuras estão previstas como: a identificação dos parâmetros da camada E para auxiliar a identificação do parâmetro h'F; comparações com outros sistemas, como o ARTIST; e aplicação desse modelo para outras regiões em baixa latitude e região equatorial.

Referências

- Becker-Guedes, F.; Sahai, Y.; Fagundes, P. R.; Lima, W. L. C.; Pillat, V. G.; Abalde, J. R.; Bittencourt, J. A. Geomagnetic storm and equatorial spread-f. *Annales Geophysicae*, v. 22, n. 9, p. 3231-3239, 2004. ISSN 0992-7689. Disponível em: <<http://www.ann-geophys.net/22/3231/2004/>>
- Berkey, F. T.; Sikdar, P. Studies of the temperate e-layer using a windowed fuzzy clustering technique. *Proceedings of the 11th Ionospheric Effects Symposium*, Alexandria, VA, v. 6B, n. Issue 3, p. A082, 2005.
- Bertoni, F.C.P.; Sahai, Y.; Raulin, J.-P.; Fagundes, P.R.; Pillat, V.G.; Gimenez de Castro, C.G.; Lima, W.L.C. Equatorial spread-F occurrence observed at two near equatorial stations in the Brazilian sector and its occurrence modulated by planetary waves. *Journal of Atmosphere and Solar-Terrestrial Physics*, 73, pp. 457-463, 2011.
- Bullett, T.; Malagnini, A.; Pezzopane, M.; Scotto, C. Application of autoscala to ionograms recorded by the vipir ionosonde. *Advances in Space Research*, Elsevier, v. 45, n. 9, p. 1156-1172, 2010
- Cardoso, F.A.; Sahai, Y.; Guarnieri, F.L.; Fagundes, P.R.; Pillat, V.G.; da Silva, J.V.P.R. Dependence of the F-region peak electron density (foF2) on solar activity observed in the equatorial ionospheric anomaly region in the Brazilian sector. *Advances in Space Research*, 48, pp. 837-841, 2011.
- Chen, Li; Adjei, Osei. λ -Connectedness and Its Applications. *Journal of Scientific and Practical Computing*, 3, pp. 19-52, 2009.
- de Jesus, R.; Sahai, Y.; Guarnieri, F.L.; Fagundes, P.R.; de Abreu, A. J.; Pillat, V.G.; Lima, W.L.C. F-region ionospheric parameters observed in the equatorial and low latitude regions during medium solar activity in the Brazilian sector and comparison with the IRI-2007 model results. *Advances in Space Research*, 47, pp. 718-728, 2011.
- Fagundes, P. R.; Pillat, V. G.; Bolzan, M. J. A.; Sahai, Y.; Becker-Guedes, F.; Abalde, J. R.; Aranha, S. L. Observations of f-layer electron density profiles modulated by planetary wave type oscillations in the equatorial ionospheric anomaly region. *J. Geophys. Res.*, v. 110, n. A12302, 2005. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1029/2005JA011115>>.
- Fagundes, P. R.; Klausner, V.; Sahai, Y.; Pillat, V. G.; Becker-Guedes, F.; Bertoni, F. C. P.; Bolzan, M. J. A.; Abalde, J. R. Observations of daytime f2-layer stratification under the southern crest of the equatorial ionization anomaly region. *J. Geophys. Res.*, v. 112, n. A04302, 2007. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1029/2006JA011888>>.
- Fagundes, P. R.; Muella, M.; Bittencourt, J.; Sahai, Y.; Lima, W.; Guarnieri, F.; Becker-Guedes, F.; Pillat, V. G.; Ferreira, A.; Lima, N. Nighttime ionosphere thermosphere coupling observed during an intense geomagnetic storm. *Advances in Space Research*, v. 41, p. 539-547, 2008.
- Galkin, I. A.; Reinisch, B. W.; Ososkov, G. A.; Zaznobina, E. G.; Neshyba, S. P. Feedback neural networks for artist ionogram processing. *Radio Sci.*, v. 31(5), p. 1119-1128, 1996. DOI: <<http://dx.doi.org/10.1029/96RS01513>>.
- Huang, X.; Reinisch, B.W.. Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms 2. True height inversion of topside ionograms with the profile-fitting method. *Radio Sci.*, 17 (4), pp. 837-844, 1982.

- Lima, W. L. C.; Becker-Guedes, F.; Sahai, Y.; Fagundes, P. R.; Abalde, J. R.; Crowley, G.; Bittencourt, J. A. Response of the equatorial and low-latitude ionosphere during the space weather events of april 2002. *Annales Geophysicae*, v. 22, n. 9, p. 3211-3219, 2004. ISSN 0992-7689. Disponível em: <<http://www.ann-geophys.net/22/3211/2004/>>.
- Macdougall, J.; Grant, I.; Shen, X. The Canadian advanced digital ionosonde: design and results. [S.l.], 1995.
- Muella, M.; Fagundes, P. R.; Bittencourt, J. A.; Sahai, Y.; Lima, W.; Becker-Guedes, F.; Pillat, V. G. Nighttime thermospheric meridional neutral winds inferred from ionospheric h'f and hp2 data. *Advances in Space Research*, v. 41, p. 599-610, 2008.
- Oliveira, V. K. D.; Fagundes, P. R.; Sahai, Y.; Wrasse, C. M.; Pillat, V. G.; Becker-Guedes, F. Observations of gw/tids oscillations in the f2-layer at low latitude during high and low solar activity, geomagnetic quiet and disturbed periods. *J. Geophys. Res.*, v. 1, p. 1-10, 2009.
- Pezzopane, M.; Scotto, C.. Automatic scaling of critical frequency fof2 and muf (3000) f2: A comparison between autoscala and artist 4.5 on Rome data. *Radio Science-Washington-*, AGU American Geophysical Union, v. 42, n. 4, 2007.
- Piggott, W.R.; Rawer, K. U.R.S.I. Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction, World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. NOAA, Boulder, CO, 1972.
- Pillat, V.; Guimarães, L. Definição de regiões ionosféricas utilizando lógica nebulosa. In: 33º Congresso Nacional de Matemática e Computação (CNMAC), Águas de Lindóia, SP, Anais do CNMAC, v. 3, p. 290-296, 2010.
- Reinisch, B.W.; Huang, X.. Automatic calculations of electron density profiles from digital ionograms, 1, Automatic O and X trace identification for topside ionograms. *Radio Sci.*, 17 (2), pp. 421–434, 1982.
- Reinisch, B.W.; Huang, X.. Automatic calculations of electron density profiles from digital ionograms, 3, Processing of bottomside ionograms. *Radio Sci.*, 18 (3), pp. 477–492, 1983.
- Sahai, Y.; Fagundes, P. R.; de Jesus, R.; de Abreu, A. J.; Crowley, G.; Kikuchi, T.; Huang, C.-S.; Pillat, V. G.; Guarnieri, F. L.; Abalde, J. R.; Bittencourt, J. A. Studies of ionospheric F-region response in the Latin American sector during the geomagnetic storm of 21–22 January 2005. *Ann. Geophys.*, 29, pp. 919-929, 2011.
- Sperandio, Décio; Mendes, João Teixeira; Monken e Silva, Luiz Henry. Cálculo numérico: características matemáticas e computacionais dos métodos numéricos. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 354 p, 2006, ISBN 8587918745.
- Tsai, L.-C.; Berkey, F. Ionogram analysis using fuzzy segmentation and connectedness techniques. *Radio Sci.*, v. 35, p. 1173-1186, 2000.
- Tsoukalas, L. H., Uhrig, R. E. “Fuzzy and Neural Approaches in Engineering”, Nova York, p. 600, 1997.