

RESPOSTA DA IONOSFERA EQUATORIAL EM ARAGUATINS (TO) A EVENTOS HILDCAA DURANTE AGOSTO DE 2017

Josiely Aparecida do Espírito Santo Toledo, Laura Luiz Trigo, Virginia Klausner, Valdir Gil Pillat.

Universidade do Vale do Paraíba/Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, josielytoledo@univap.br, ltrigo@univap.br, virginia@univap.br, valdir@univap.br.

Resumo

Este estudo investiga a resposta da ionosfera equatorial durante o mês de agosto de 2017, utilizando dados da ionossonda CADI instalada em Araguatins (TO). O período analisado inclui dois episódios subsequentes de HILDCAA (*High-Intensity, Long-Duration, Continuous AE Activity*), associados a fluxos de alta velocidade do vento solar (HSS). Foram processados 31 dias de observações para extração dos parâmetros ionosféricos f^oF_2 , $h'F_2$ e f_oF_2 , além da deriva zonal em três componentes V_d mean (condições de dia calmo), V_d storm (perturbações) e V_d total (soma) estimadas por meio do modelo empírico de Scherliess e Fejer (1999). Os resultados revelam que excursões negativas do componente B_z do campo magnético interplanetário (IMF), acompanhadas por quedas no índice Sym-H, coincidem com intensificações do campo elétrico interplanetário ($E_y \approx -V_x \cdot B_z$). Esses episódios geram anomalias nos parâmetros ionosféricos, particularmente em fortes oscilações na componente V_d storm. Tal comportamento é compatível com a atuação de campos elétricos de penetração rápida (*Prompt Penetration Electric Fields*) PPEFs, evidenciando o impacto cumulativo e prolongado dos eventos HILDCAA sobre a ionosfera equatorial brasileira.

Palavras-chave: Ionosfera equatorial. HILDCAA. Deriva zonal. Anomalia de ionização equatorial.

Área do Conhecimento: Geociências.

Introdução

A ionosfera, localizada na termosfera entre aproximadamente 80 e 640 km de altitude, constitui uma das regiões mais dinâmicas e variáveis da atmosfera terrestre (NASA, 2019). Sua formação resulta da interação da radiação solar de alta energia, especialmente nos comprimentos de onda de raios X e ultravioleta extremo (EUV), com os gases atmosféricos, processo que gera íons e elétrons caracterizando esse plasma (NAGY; SCHUNK, 2000). A estrutura e o comportamento da ionosfera são modulados por fatores como o ciclo dia-noite, a estação do ano, a latitude e as condições do clima espacial (KELLEY, 2009).

Além disso, os processos eletrodinâmicos desempenham um papel fundamental na redistribuição do plasma ionosférico em regiões equatoriais. A interação entre o campo elétrico (E), de origem externa ou interna, e o campo magnético geomagnético (B), gera uma velocidade de deriva perpendicular ($E \times B$), que pode elevar o plasma da região equatorial para altitudes maiores. Esse transporte vertical é um dos principais mecanismos por trás do chamado efeito fonte (*fountain effect*), o qual intensifica a Anomalia de Ionização Equatorial (AIE), resultando em máximos de densidade eletrônica nas cristas equatoriais localizadas entre 10° e 15° de latitude magnética (ABDU, 2005; BALAN; BAILEY, 1995).

A estação de Araguatins (TO), situada na região equatorial, constitui um ponto estratégico para o monitoramento da variabilidade ionosférica e a investigação de sua resposta a distúrbios geomagnéticos, especialmente durante eventos de longa duração, como os eventos HILDCAA (SILVA *et al.*, 2017). Do ponto de vista estrutural, a ionosfera é classificada em três regiões principais: D, E e F. Durante o dia, todas apresentam aumento na densidade eletrônica devido ao predomínio dos processos de fotoionização, especialmente pela radiação solar nas faixas de raios X e EUV. A camada F, principal responsável pela reflexão das ondas de rádio em altas frequências, pode se subdividir em F1 e F2 nas horas diurnas. À noite, a ausência da radiação solar leva à redução significativa da densidade eletrônica, sobretudo nas camadas D e E, devido à predominância dos processos de

recombinação entre íons e elétrons. A camada D praticamente desaparece nesse período, enquanto a F2 permanece, embora com densidade reduzida (SCHUNK; NAGY, 2000).

O ambiente espacial é significativamente modificado por distúrbios de longa duração associados à atividade de buracos coronais. Esses buracos, localizados predominantemente em regiões polares durante o mínimo solar, tornam-se mais frequentes em latitudes médias e baixas durante a fase descendente do ciclo solar, resultando em emissões persistentes de *High-Speed Streams* (HSS) fluxos de vento solar de alta velocidade. Quando esses HSS interagem com o vento solar lento que os precede, formam regiões de interação de feixe, conhecidas como *Stream Interaction Regions* (SIRs), caracterizadas por discontinuidades na densidade, velocidade e campo magnético interplanetário (TSURUTANI *et al.*, 2006). Essas interações dão origem a perturbações geomagnéticas duradouras, distintas das tempestades geradas por ejeções de massa coronal (CMEs), por apresentarem intensidade moderada, porém maior persistência (MENEZES, 2021).

Em latitudes baixas, como sobre o território brasileiro, os eventos SIR e HSSs podem induzir efeitos acumulativos na ionosfera, afetando a distribuição de densidade eletrônica e a dinâmica do plasma em escalas temporais de vários dias. Tais efeitos estão frequentemente associados à ocorrência de eventos HILDCAA (*High-Intensity, Long-Duration, Continuous AE Activity*), que consistem em períodos prolongados de atividade auroral intensa, porém contínua, intercalados com condições subtempestivas (ABAIDOO *et al.*, 2025). Durante tempestades geomagnéticas, a interação entre o vento solar e a magnetosfera pode induzir campos elétricos de grande escala que se propagam eficientemente até a ionosfera equatorial, modulando significativamente a dinâmica do plasma. Esse processo é conhecido como Penetração de Campo Elétrico (*Prompt Penetration Electric Field*) PPEF e está fortemente associado à orientação sul do campo magnético interplanetário ($IMF-B_z < 0$), que facilita o acoplamento entre o vento solar e a magnetosfera por meio do processo de reconexão magnética (DAL LAGO, 1999). A resposta ionosférica a esses campos elétricos pode ocorrer em escalas de tempo da ordem de minutos, afetando diretamente as derivas verticais do plasma, principalmente na região equatorial.

Para caracterizar o comportamento eletrodinâmico em condições geomagneticamente calmas, este estudo faz uso do modelo empírico desenvolvido por Scherliess e Fejer (1999), que se baseia em extensas séries temporais obtidas por satélites e descreve a climatologia das derivas verticais de plasma em baixas latitudes (FEJER *et al.*, 1991). A partir da comparação entre as observações obtidas em Araguatins (TO) e os valores climatológicos do modelo Fejer, é possível identificar desvios significativos durante eventos perturbados, permitindo quantificar o impacto de eventos prolongados como os HILDCAA sobre o acoplamento eletrodinâmico na ionosfera equatorial brasileira.

Metodologia

Neste trabalho foram utilizados dados da ionossonda CADI (*Canadian Advanced Digital Ionosonde*) do observatório de Araguatins (5,65° S, 48,07° W; dip latitude: 4,17° S), localizado em baixa latitude, próximo à linha do Equador (AGYEI-YEBOAH *et al.*, 2021). A CADI emite pulsos de rádio entre 1 e 20 MHz e registra os ecos refletidos pelas camadas ionosféricas, gerando ionogramas de alta resolução temporal e espectral (MACDOUGALL *et al.*, 1995). A partir dos ionogramas, foram extraídos os parâmetros característicos da camada F ($h'F$, f_oF_2 , hmF_2), que serviram como base para a análise estatística e identificação das anomalias.

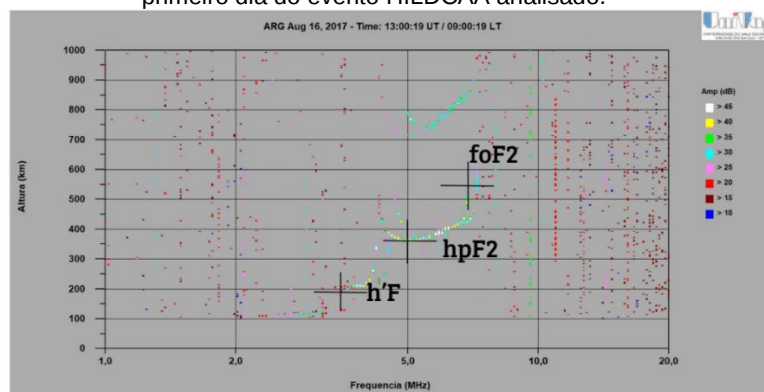
Foram processados 31 dias de observações referentes a agosto de 2017, com intervalo temporal de 5 minutos. Esse mês corresponde ao inverno no hemisfério sul, caracterizado por menor incidência de radiação solar, o que influencia as condições ionosféricas (KELLEY, 2009). O período de 16 a 26 de agosto foi selecionado como foco do estudo, por conter dois episódios subsequentes de HILDCAA, associados a HSS e SIRs (TSURUTANI *et al.*, 1995). Para efeito de comparação, foram selecionados também cinco dias geomagneticamente calmos (28,15, 26, 9, 2) de agosto para o cálculo da linha de base diurna típica (S_q). A seleção baseou-se na análise do índice planetário K_p , determinado em intervalos de três horas (totalizando oito valores por dia), podendo também ser representado pela sua somatória ao longo de 24 horas, (BARTELS, 1949) e confirmados pelo índice Sym-H, disponibilizados pelo *WDC for Geomagnetism* (KYOTO, 2025).

Os ionogramas foram reduzidos utilizando o software UDIDA (*UNIVAP Digital Ionosonde Data Analysis*) (PILLAT; FAGUNDES, 2004), que permite a marcação manual dos traços e a conversão dos registros em arquivos reduzidos, organizados em intervalos regulares de 5 minutos. A Figura 1 exemplifica um ionograma reduzido da estação de Araguatins, no qual estão destacados os principais

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

parâmetros da camada F: $h'F$ (altura virtual mínima da camada F), $foF2$ (frequência crítica da camada F2) e $hpF2$, altitude correspondente à máxima densidade eletrônica da camada F. Para cada horário local de agosto de 2017, foram calculados as médias climatológicas e os desvios padrão a partir dos dias calmos. A partir disso, foram obtidos os desvios $\Delta foF2$, $\Delta hmF2$ e $\Delta h'F$, definidas pela diferença entre os valores observados e a média climatológica do mesmo horário (JOHNSON; WING, 2015). Para a caracterização das derivas eletrodinâmicas da ionosfera equatorial, utilizou-se o modelo Fejer. Os resultados obtidos pelo modelo foram empregados como referência climatológica de deriva, permitindo comparação com as observações locais da estação de Araguatins.

Figura 1 - Ionograma registrado em Araguatins (TO) no dia 16 de agosto de 2017 às 13:00 UT (09:00 LT), primeiro dia do evento HILDCAA analisado.



Fonte: Autores (2025).

Resultados

A Figura 2 apresenta a evolução temporal dos parâmetros geomagnéticos e ionosféricos ao longo de agosto de 2017. O primeiro painel mostra o índice Sym-H, no qual se observam quedas abruptas associadas à ocorrência de tempestades geomagnéticas. Os três painéis seguintes exibem a variação diária dos parâmetros ionosféricos absolutos de $h'F$, $hmF2$ e $foF2$. Esses parâmetros apresentam um comportamento diurno típico, com valores máximos durante o dia e redução noturna, refletindo diretamente a variação da incidência da radiação solar. Em cada um desses três painéis, a linha preta representa a média climatológica obtida a partir dos dias calmos, enquanto a faixa sombreada em cinza indica o intervalo de um desvio padrão, configurando o envelope de variação esperada sob condições geomagneticamente calmas.

Durante os eventos HILDCAA, observaram-se elevações significativas da camada F. No dia 16 de agosto, por exemplo, $hmF2$ ultrapassou 500 km ($\approx +200$ km em relação à climatologia de ≈ 320 km), enquanto $foF2$ atingiu valores próximos de 11 MHz ($\approx +3$ MHz em relação à média de dias calmos, ≈ 8 MHz). O parâmetro $h'F$ também apresentou elevações da ordem de $+100$ km em relação à média (~ 200 km), indicando intensificação da ionização na região F. Ao longo do período perturbado, as anomalias mais intensas chegaram a cerca de $+200$ km em $h'F$ e $hmF2$ e até $+5$ MHz em $foF2$, reforçando a associação entre os distúrbios geomagnéticos e a resposta ionosférica observada.

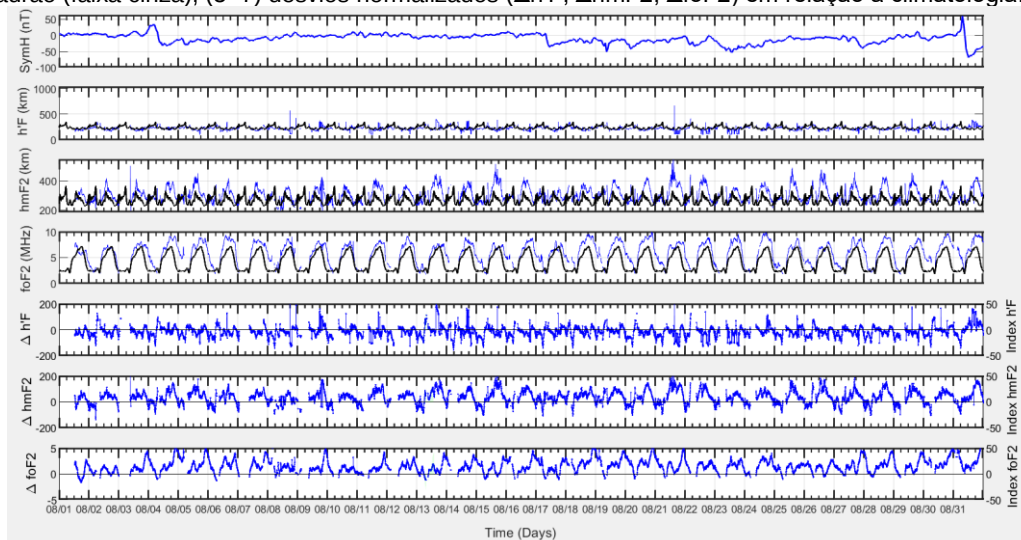
Na sequência, os três últimos painéis mostram os desvios normalizados ($\Delta h'F$, $\Delta hmF2$ e $\Delta foF2$), calculados como a diferença entre os valores observados e a média climatológica. Esses desvios evidenciam anomalias ionosféricas significativas, sobretudo durante os períodos de maior perturbação geomagnética, indicando intensificações (valores positivos) ou depleções (valores negativos) acentuadas nos parâmetros ionosféricos. Tais flutuações são compatíveis com a atuação de campos elétricos de penetração (PPEF), os quais intensificam a circulação eletrodinâmica na região equatorial durante períodos de acoplamento eficiente entre o vento solar e a magnetosfera.

Durante o período analisado, foram identificados dois eventos HILDCAA subsequentes: o primeiro ocorreu entre 16 e 21 de agosto, e o segundo, entre 21 e 24 de agosto. Para avaliar os efeitos desses distúrbios na dinâmica zonal da ionosfera, a velocidade de deriva zonal (V_d) foi decomposta em três componentes: V_d_mean , obtida a partir do modelo Fejer 1999, representa a climatologia de dia calmo; V_d_storm , associada à perturbação eletrodinâmica induzida pela atividade geomagnética; e V_d_total , que corresponde à soma das componentes anteriores, fornecendo o perfil total da deriva estimada. Na Figura 3, o painel superior mostra o campo elétrico interplanetário (E_y), seguido da componente B_z do

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

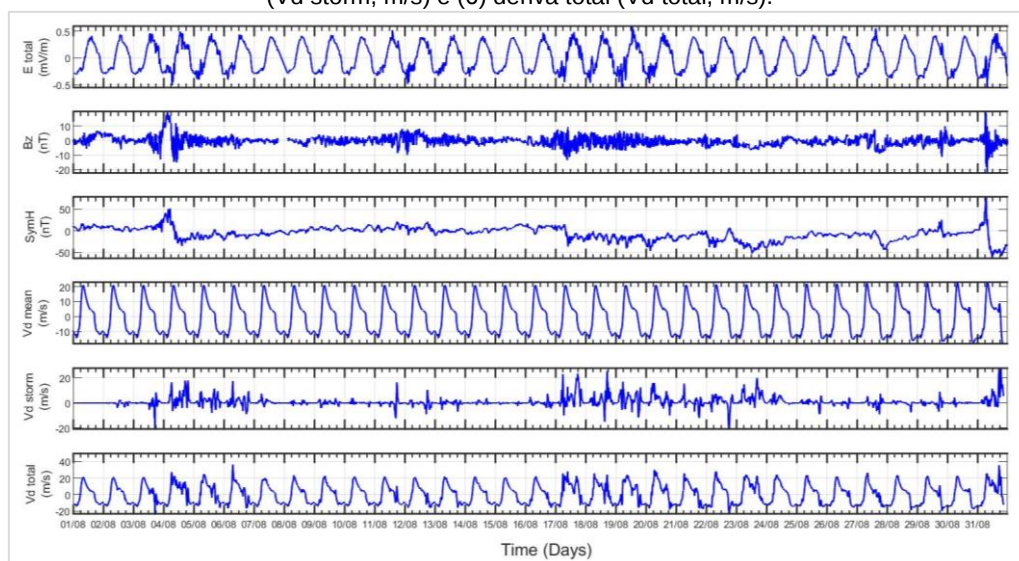
IMF e do índice Sym-H. Nos painéis inferiores são exibidos as derivas ionosféricas (Vd mean, Vd storm e Vd total). Observa-se que excursões negativas do Bz e quedas no índice Sym-H ocorrem de forma simultânea a $E_y > 0$ e a oscilações expressivas em Vd storm, configurando condições típicas de penetração de campos elétricos (ABDU, 2005; FEJER, 1991).

Figura 2. Variação temporal de parâmetros geomagnéticos e ionosféricos em agosto de 2017. Painéis: (1) índice Sym-H (nT); (2–4) parâmetros da camada F (h'F, hmF2, foF2) com média climatológica (linha preta) e desvio-padrão (faixa cinza); (5–7) desvios normalizados ($\Delta h'F$, $\Delta hmF2$, $\Delta foF2$) em relação à climatologia.



Fonte: Autores (2025).

Figura 3. Evolução dos parâmetros interplanetários, geomagnéticos e ionosféricos em agosto de 2017: (1) E total (mV/m), (2) IMF-Bz (nT), (3) Sym-H (nT), (4) climatologia da deriva (Vd mean, m/s), (5) componente perturbada (Vd storm, m/s) e (6) deriva total (Vd total, m/s).



Fonte: Autores (2025).

Discussão

Os resultados obtidos evidenciam a resposta da ionosfera equatorial às condições interplanetárias e geomagnéticas durante agosto de 2017, especialmente em associação aos eventos HILDCAA. As excursões negativas do IMF-Bz e as quedas pronunciadas no índice Sym-H coincidiram com

intensificações no campo elétrico interplanetário ($E_y = -V_x \cdot B_z$), gerando as condições necessárias para PPEFs. Em particular, as flutuações observadas nos parâmetros hmF2 e foF2, bem como as oscilações expressivas na componente Vd_storm da deriva zonal, são compatíveis com a atuação de PPEFs. Em condições calmas, Vd_mean segue o padrão diurno esperado para baixas latitudes (FEJER *et al.*, 1991). No entanto, durante os episódios HILDCAA, Vd_storm apresentou intensificações coerentes com os episódios de acoplamento solar-terrestre, indicando que o padrão de deriva pode ser modulado diretamente por variações no campo elétrico interplanetário.

Adicionalmente, a localização da estação de Araguatins, próxima ao centro da AIE, permite observar os efeitos da deriva zonal sobre a estrutura ionosférica local. Os dados revelam que intensificações na deriva estão associadas à elevação da camada F, evidenciando a influência de processos eletrodinâmicos sobre a redistribuição do plasma. A presença de dois eventos HILDCAA consecutivos no mês de agosto, ambos impulsionados por HSSs e SIRs, reforça o entendimento de que distúrbios de longa duração também exercem efeitos cumulativos expressivos sobre a ionosfera equatorial devido a ação de PPEFs e do dínamo perturbado (GUARNIERI, 2006; TSURUTANI *et al.*, 2006).

Conclusão

Este estudo investigou a resposta da ionosfera equatorial brasileira durante agosto de 2017, a partir de observações da ionossonda CADI instalada em Araguatins (TO) e da comparação com o modelo empírico 1999. O mês analisado foi marcado pela ocorrência de dois eventos HILDCAA sucessivos, relacionados a HSS e SIRs, o que proporcionou um cenário ideal para avaliação dos efeitos de distúrbios prolongados de origem solar sobre a região da AIE.

Os resultados mostraram que as anomalias nos parâmetros h'F, hmF2 e foF2, bem como as variações da deriva zonal (Vd_storm), ocorreram de forma sincrônica às intensificações no campo elétrico interplanetário e às excursões negativas do IMF-Bz, fenômenos indicativos de acoplamento solar-terrestre eficiente. Esse comportamento é coerente com a atuação de campos elétricos de penetração, capazes de modificar rapidamente a circulação eletrodinâmica da ionosfera de baixas latitudes.

A análise evidencia que, mesmo na ausência de tempestades geomagnéticas intensas, os efeitos cumulativos de eventos HILDCAA impulsionados por HSS e SIRs são suficientes para provocar distúrbios significativos na ionosfera equatorial de h'F e hmF2 de ± 200 km e foF2 de ± 5 MHz. Os achados reforçam a importância de se monitorar continuamente essas regiões e incorporar esses efeitos nos modelos de previsão ionosférica, especialmente em contextos de aplicações como navegação por satélite, comunicações de alta frequência (*High Frequency*) e sistemas GNSS.

Referências

ABAIDOO, Samuel et al. **CIR-Driven Geomagnetic Storm and High-Intensity Long-Duration Continuous AE Activity (HILDCAA) Event: Effects on Brazilian Equatorial and Low-Latitude Ionosphere—Observations and Modeling**. *Atmosphere*, v. 16, n. 5, p. 499, 2025.

ABDU, Mangalathayil Ali. **Equatorial ionosphere–thermosphere system: Electrodynamics and irregularities**. *Advances in Space Research*, v. 35, n. 5, p. 771-787, 2005.

AGYEI-YEBOAH, Ebenezer et al. **Ground and satellite-based observations of ionospheric plasma bubbles and blobs at 5.65 latitude in the Brazilian sector**. *Advances in Space Research*, v. 67, n. 8, p. 2416-2438, 2021.

BALAN, N.; BAILEY, G. J. **Equatorial plasma fountain and its effects: Possibility of an additional layer**. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 100, n. A11, p. 21421-21432, 1995.

BARTELS, J., 1949. The standardized index, Ks, and the planetary index, Kp, *IATME Bull.* 12b, 97-120.

DAL LAGO, Alisson. **Estudo de nuvens magnéticas geofetivas no meio interplanetário. São José dos Campos**. 122p.(INPE-7263-TDI/705). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) –Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.

FEJER, Bela G. et al. **Average vertical and zonal F region plasma drifts over Jicamarca.** Journal of Geophysical Research: Space Physics, v. 96, n. A8, p. 13901-13906, 1991.

GUARNIERI, F. L. **The nature of auroras during high-intensity long-duration continuous AE activity (HILDCAA) events: 1998 to 2001.** Recurrent Magnetic Storms: Corotating Solar Wind, v. 167, p. 235, 2006.

JOHNSON, J. R.; and WING, S. (2015). **The dependence of the strength and thickness of field-aligned currents on solar wind and ionospheric parameters.** *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 398-4008. doi: 10.1002/2014JA020312.

KELLEY, Michael C. **The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics.** 2. ed. San Diego: Academic Press, 2009. p. 4.

MACDOUGALL, J. W.; GRANT, I. F.; SHEN, X. **The Canadian advanced digital ionosonde: design and results.** Report UAG-14: Ionospheric Networks and Stations, World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics, v. 21, p. 132-145, 1995.

MENEZES, Fabian Marcel. **Influência da atividade magnética na atmosfera solar e na propagação de ejeções de massa coronal de estrelas do tipo-solar.** 2021.

NASA-NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **What is the Ionosphere?** 10 dez. 2019. Disponível em: <https://translate.google.com/translate?u=https://science.nasa.gov/earth/10-things-to-know-about-the-ionosphere/&hl=pt&sl=en&tl=pt&client=srp>. Acesso em: 15 ago. 2025.

PILLAT, Valdir Gil; FAGUNDES, Paulo Roberto. **UDIDA UNIVAP DIGITAL IONOSONDE DATA ANALYSIS.** VII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IV Encontro Americano de Pós-Graduação-EPG, v. 4, p. 1178-1184, 2004.

SCHUNK, Robert W.; NAGY, Andrew F. **Ionospheres: Physics, plasma physics, and chemistry.** Cambridge university press, 2000.

SILVA, Regia Pereira et al. **Evidence of prompt penetration electric fields during HILDCAA events.** In: *Annales Geophysicae*. Göttingen, Germany: Copernicus Publications, 2017. p. 1165-1176.

TSURUTANI, Bruce T. et al. **Interplanetary origin of geomagnetic activity in the declining phase of the solar cycle.** Journal of Geophysical Research: Space Physics, v. 100, n. A11, p. 21717-21733, 1995.

TSURUTANI, Bruce T. et al. **Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review.** Journal of Geophysical Research: Space Physics, v. 111, n. A7, 2006.

WORLD DATA CENTER FOR GEOMAGNETISM, KYOTO. Kp Index. Kyoto University. Disponível em: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html>. Acesso em: 16 ago. 2025.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer à Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP) pelo apoio institucional durante a pesquisa. Nosso agradecimento especial à Prof.^a Dr.^a Virginia Klausner e ao Prof. Dr. Valdir Gil Pillat, pela orientação e constante dedicação. Estendemos nossa gratidão às nossas famílias e amigos, pelo incentivo e apoio incondicional ao longo deste trabalho.