

VARIAÇÕES EM $h'F$, $foF2$ E $hmF2$ NA IONOSFERA DE BAIXA LATITUDE: ANÁLISE DE DADOS DA CADI EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

Laura Luiz Trigo, Josiely Aparecida do Espírito Santo Toledo, 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, ltrigo@univap.br,
josielytoledo@univap.br, virginia@univap.br, valdir@univap.br.

Resumo

Este estudo caracteriza a variabilidade da ionosfera sobre São José dos Campos (SP) em agosto de 2017 a partir de dados da ionossonda digital CADI, com foco nos parâmetros da camada F ($foF2$, $h'F$ e $hmF2$). Para estabelecer a linha de base, selecionaram-se os cinco dias geomagneticamente mais calmos do mês. Os ionogramas foram reduzidos no software UDIDA e os parâmetros analisados estatisticamente no MATLAB. Observam-se variações diurnas típicas decorrentes da interação Sol-Terra e flutuações adicionais associadas a processos eletrodinâmicos locais (p. ex., deriva $E \times B$ e ventos termosféricos). Mesmo em condições geomagneticamente calmas, ocorrem anomalias relevantes, evidenciando a natureza dinâmica da ionosfera em baixas latitudes. Os resultados reforçam a necessidade de monitoramento contínuo e de incorporação de fatores locais em modelos preditivos, com implicações diretas para aplicações em telecomunicações e navegação por satélite.

Palavras-chave: Ionosfera. Análise de Ionogramas. Monitoramento Ionosférico. Clima Espacial.

Área do Conhecimento: Geociências.

Introdução

A ionosfera corresponde à porção mais alta da atmosfera terrestre, caracterizada por um grau de ionização suficientemente elevado para influenciar a propagação de ondas de rádio. Para efeitos práticos, a atmosfera pode ser representada como uma sucessão de camadas gasosas concêntricas em torno da Terra, cuja configuração resulta da interação de processos térmicos, químicos e eletromagnéticos (Hargreaves, 1992). Esses fatores apresentam variações expressivas em função do horário, posição geográfica latitude e longitude, estação do ano e nível de atividade solar (DAVIES, 1990). A atmosfera terrestre, composta por uma mistura de átomos e moléculas neutras, além de partículas carregadas como íons e elétrons livres. Neste contexto, destaca-se a ionosfera, que se estende aproximadamente dos 70 km até cerca de 1000 km de altitude. Essa região é definida pelo aumento significativo da densidade eletrônica, suficiente para afetar fenômenos eletromagnéticos, especialmente a propagação de ondas de rádio. A ionosfera é, por sua vez, subdividida em três camadas principais: D (70–90 km), E (90–150 km) e F (150–1000 km), de acordo com o perfil vertical da densidade eletrônica (Yamashita, 2000).

A camada F da ionosfera destaca-se por apresentar a maior densidade de elétrons livres e ser responsável pela maior parte da reflexão das ondas de rádio de alta frequência. Durante o dia, essa camada se subdivide em F1 e F2, cada uma apresentando características distintas de densidade eletrônica e comportamento conforme o horário, a estação do ano e o nível de atividade solar. A camada F2 é a parte mais alta da ionosfera e geralmente concentra a maior quantidade de elétrons. Essa característica faz com que ela desempenhe um papel fundamental na reflexão de sinais de rádio de altas frequências, permitindo comunicações a longas distâncias. Em regiões de baixas latitudes, como o Brasil, a F2 é fortemente influenciada por fenômenos como a anomalia de ionização equatorial, que podem tanto ampliar o alcance da propagação quanto causar interferências e degradação do sinal (Rishbeth *et al.*, 1969). Flutuações nessas camadas, causadas por tempestades geomagnéticas e oscilações diurnas, podem gerar irregularidades ionosféricas, por sua vez, podem provocar o fenômeno conhecido como “*Spread-F*”, caracterizado pelo alargamento dos ecos no ionograma e indicando dispersão das camadas refletoras (Piggott; Rawer, 1972).

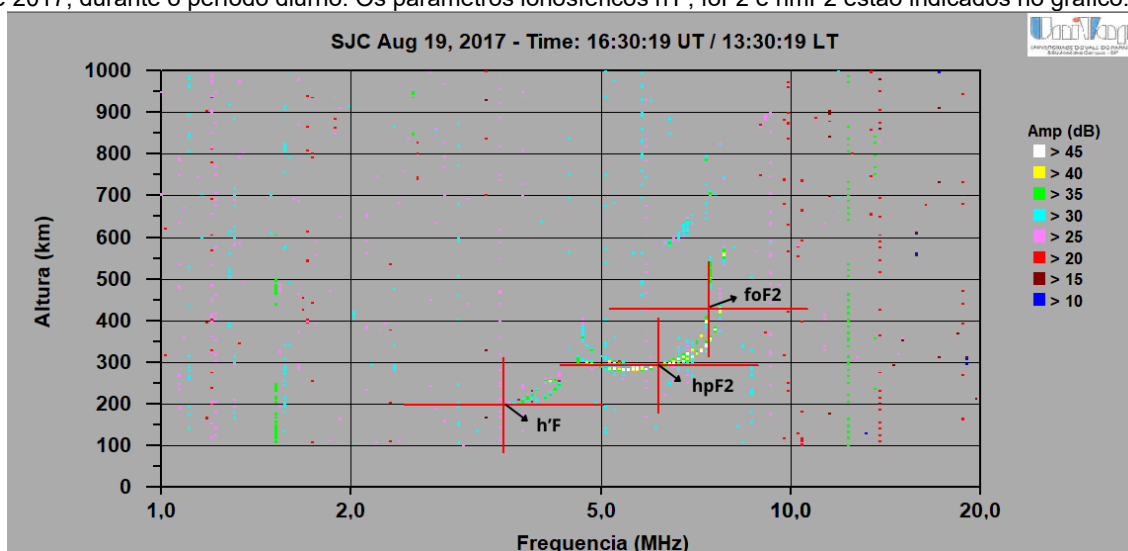
A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Para estudar tais fenômenos, utilizam-se instrumentos especializados, como a ionossonda digital, que opera transmitindo ondas de rádio em diferentes frequências em direção à atmosfera e mede o eco refletido pelas camadas ionosféricas. O resultado dessas medições é o ionograma, um gráfico que relaciona a frequência do sinal à altura virtual de reflexão. A partir dele, é possível extrair parâmetros como a altura virtual da base da camada F ($h'F$), a frequência crítica da camada F ($foF2$) e a altura do pico de densidade eletrônica ($hmF2$). Esses dados são cruciais para compreender a estrutura, as instabilidades e as variações rápidas na qualidade do canal de rádio, além de contribuir para o desenvolvimento de técnicas para minimizar o impacto dos distúrbios em sistemas GNSS e de radiocomunicação. Este estudo concentra-se em São José dos Campos – SP, local de origem dos registros analisados. Foram utilizados ionogramas digitais obtidos pela ionossonda CADI (*Canadian Advanced Digital Ionosonde*) localizada no campus da Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), que monitora continuamente variáveis do clima espacial em baixas latitudes (Mendonça, 2013). A escolha de São José dos Campos como ponto de coleta se justifica por sua localização em baixas latitudes, faixa essencial para modelar e compreender o comportamento da ionosfera no Brasil, país cuja maior parte do território se encontra nesse domínio, marcado por elevada variabilidade ionosférica e pela influência da Anomalia de Ionização Equatorial (EIA). Além disso, a cidade abriga centros consolidados de pesquisa e desenvolvimento, como a UNIVAP e o INPE, oferecendo infraestrutura científica e favorecendo a integração com outras observações.

Metodologia

As análises foram realizadas a partir de ionogramas obtidos pela ionossonda CADI, instalada em São José dos Campos (23,2°S, 45,9°W; latitude magnética 17,6°S) (Pezzopane *et al.*, 2017). Esse equipamento opera transmitindo pulsos de rádio na faixa de 1–20 MHz, que são refletidos pelas diferentes camadas da ionosfera e registrados sob a forma de ionogramas digitais. Esses registros relacionam a frequência do sinal refletido com a altura virtual, permitindo a extração dos parâmetros $foF2$ (frequência crítica da camada F2), $h'F$ (altura virtual mínima da camada F) e $hmF2$ (altura do pico de densidade eletrônica).

Figura 1 - Ionograma adquirido no software UDIDA para a estação de São José dos Campos em 02 de agosto de 2017, durante o período diurno. Os parâmetros ionosféricos $h'F$, $foF2$ e $hmF2$ estão indicados no gráfico.



Fonte: Autores (2025).

O período analisado corresponde ao mês de agosto de 2017. Dentro desse conjunto, foram selecionados os cinco dias geomagneticamente mais calmos do mês (*Sq-days*), determinados a partir do índice planetário Kp disponibilizado pelo *WDC for Geomagnetism*. O índice Kp é calculado em intervalos de três horas, totalizando oito valores diários, e pode também ser representado pela sua somatória ao longo de 24 horas (Bartels, 1949). Essa característica permite identificar variações na

atividade geomagnética ao longo do dia, facilitando a seleção precisa dos períodos mais calmos para análise.

A CADI é uma ionossonda que transmite pulsos de rádio entre 1 e 20 MHz e registra digitalmente os ecos refletidos pelas camadas ionosféricas, produzindo ionogramas de alta frequência temporal e espectral (MacDougall *et al.*, 1995). Neste estudo, foram reduzidos e analisados 31 dias de dados de agosto de 2017, com resolução temporal de cinco minutos. O grande volume de registros demandou processamento semi-automatizado no software UDIDA (*UNIVAP Digital Ionosonde Data Analysis*), desenvolvido na UNIVAP (Pillat; Fagundes, 2004). Realizou-se a redução dos ionogramas e a extração dos parâmetros da camada F: $h'F$, $foF2$ e $hmF2$ (Figura 1). Em propagação eletromagnética com ionossonda, o traço no ionograma representa a altura virtual $h'F$, calculada a partir do atraso de grupo assumindo propagação à velocidade da luz. Ela é chamada de “virtual” porque, em geral, excede a altitude real de reflexão, já que não corrige a redução da velocidade de grupo imposta pelo plasma abaixo do ponto de reflexão. À medida que a frequência de sondagem aumenta, o pulso encontra regiões de maior frequência de plasma, e a altura virtual cresce até atingir a frequência crítica da camada, ($foF2$ para a F2). Acima dessa frequência o sinal não é mais refletido, penetra a camada e o eco desaparece do registro.

Em situações de múltiplas trajetórias de reflexão entre o solo e a ionosfera, um mesmo eco pode ser registrado mais de uma vez, aparecendo em diferentes alturas no ionograma. Para estabelecer uma linha de base da variabilidade ao longo de agosto de 2017, foram selecionados os cinco dias geomagneticamente mais calmos do mês (28, 15, 9, 2 e 30) classificados como “Sq-days”. A identificação foi feita a partir do índice planetário Kp e confirmada pelo índice Sym-H, ambos disponibilizados pelo *World Data Center for Geomagnetism* (Kyoto, 2025). Esses dias foram utilizados como referência para descrever o comportamento médio mensal de $foF2$, $hmF2$ e $h'F$, minimizando a influência de perturbações transitórias. A redução dos ionogramas foi realizada no software UDIDA, com os dados processados para intervalos regulares de 5 minutos. O procedimento foi realizado por meio de marcação manual das alturas e frequências associadas à camada F, gerando arquivos reduzidos em formato .txt. Esses arquivos foram processados no MATLAB, onde foram calculados as médias climatológicas e os desvios padrão com base nos dias calmos, além das anomalias $\Delta h'F$, $\Delta hmF2$ e $\Delta foF2$, obtidas pela diferença entre os valores observados e a média climatológica da mesma hora local (Johnson; Wing, 2015). Quando necessário, as anomalias foram normalizadas pela média ou pelo desvio padrão, permitindo a comparação relativa entre diferentes dias e horários.

A Figura 1 apresenta um ionograma obtido pela ionossonda CADI na estação de São José dos Campos. No gráfico, o eixo vertical indica a altura virtual (km) e o eixo horizontal a frequência (MHz) do sinal refletido. As cores representam a amplitude do eco em decibéis (dB), conforme a escala à direita. Em termos de propagação eletromagnética, o ionograma mostra que o eco pulso refletido retorna em alturas virtuais crescentes à medida que a frequência aumenta, até atingir a frequência crítica $foF2$, quando o sinal passa a penetrar a camada e o traço desaparece. Nesse registro pontual, destacam-se: $h'F$, que representa a altura virtual mínima do traço F; $hpF2$, a altura virtual no topo do traço F2 utilizada como referência para o pico; e $foF2$, a máxima frequência refletida na propagação vertical.

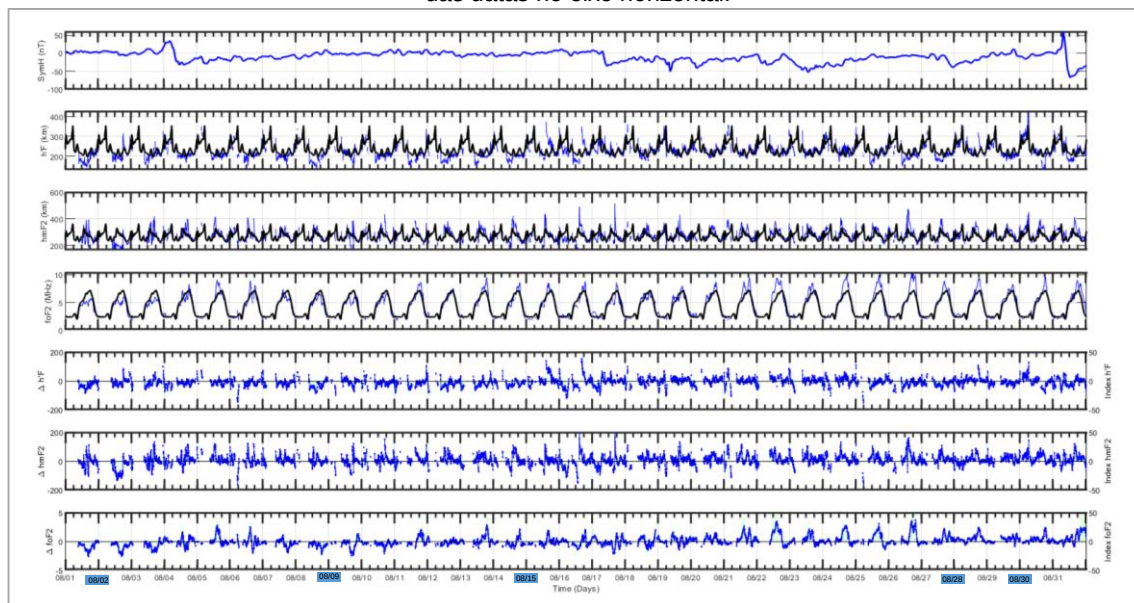
Resultados

Na Figura 2, observa-se que, sob condições de baixa atividade geomagnética, a $foF2$ apresenta valores máximos durante o dia, devido à intensa ionização solar, e mínimos à noite, quando predomina a recombinação entre íons e elétrons. Esse ciclo diário reflete diretamente o balanço entre produção e perda de plasma na região F, influenciando a capacidade de propagação de ondas de rádio em altas frequências. O parâmetro $h'F$ mantém valores mais baixos no período diurno, variando tipicamente entre 200 e 250 km, e eleva-se à noite para cerca de 280 a 320 km, em resposta à expansão da camada F para altitudes mais elevadas.

Essa elevação noturna está associada à diminuição da densidade neutra e à consequente menor taxa de recombinação, permitindo que o plasma se distribua em altitudes superiores. Já a $hmF2$ apresenta relativa estabilidade diurna, em torno de 250 a 300 km, mas se eleva no período noturno para aproximadamente 350 a 400 km, indicando o deslocamento do pico de densidade eletrônica devido à redução da densidade neutra e à expansão da camada para altitudes maiores (Kelley, 2009). As anomalias $\Delta h'F$, $\Delta hmF2$ e $\Delta foF2$ evidenciam a identificação de padrões regulares e mostram

pequenas flutuações, possivelmente associadas a processos secundários como ventos, mesmo sob condições geomagneticamente calmas.

Figura 2 — Série temporal de agosto de 2017 em sete painéis: (1) Sym-H; (2–4) $h'F$, $hmF2$ e $foF2$; (5–7) $\Delta h'F$, $\Delta hmF2$ e $\Delta foF2$. Nos painéis 2–4, a linha preta indica a variação S_q , a faixa cinza o desvio-padrão e a linha azul os valores diários observados. Nos painéis 5–7, as barras verdes representam os índices percentuais dos desvios normalizados. Os cinco dias geomagneticamente calmos estão destacados com marcação azul acima das datas no eixo horizontal.



Fonte: Autores (2025).

Discussão

Os resultados evidenciam a dinâmica típica de baixas latitudes, dominada pela Anomalia de Ionização Equatorial e pelo campo elétrico zonal gerado pelo dínamo de marés S_q . Durante o dia, o campo leste produz deriva $E \times B$ ascendente no equador magnético, aciona o efeito-fonte e exporta plasma ao longo das linhas de campo para cerca de ± 10 – 20° de latitude magnética, elevando $hmF2$ e aumentando $foF2$ e o TEC nas cristas da EIA (Davies, 1990). Em localidades próximas à crista sul, como São José dos Campos, $foF2$ costuma atingir máximos no início da tarde; já sobre o equador magnético é frequente a depressão ao meio-dia pela própria exportação de plasma. No crepúsculo, o aumento pré-pôr-do-sol do campo leste (PRE) pode intensificar temporariamente a deriva ascendente, enquanto à noite o campo tende a oeste, à deriva se inverte e a camada desce.

A amplitude e a fase dessas variações também refletem o papel dos ventos termosféricos meridionais e zonais, que redistribuem plasma ao longo das linhas de campo e alteram a razão O/N_2 , modificando as taxas de recombinação e, portanto, $foF2$ e $hmF2$. Modulações interdiárias adicionais surgem de marés não migrantes de origem troposférica, da variabilidade do eletrojato equatorial e de campos elétricos associados a tempestades geomagnéticas, incluindo penetração rápida (PPEFs) em escala de minutos e o dínamo perturbado (DDEFs) em escala de horas, que podem deslocar os horários dos máximos e mínimos ou amplificar e suprimir a resposta ionosférica.

Mesmo sob condições geomagneticamente calmas, observam-se desvios positivos de $\Delta h'F$ e de $hmF2$, compatíveis com marés atmosféricas migrantes e não migrantes, oscilações planetárias e variações de ventos termosféricos que modulam o dínamo de baixa latitude e a eficiência do escoamento ao longo das linhas de campo, conforme reportado para regiões de baixa latitude (Piggott e Rawer, 1972; Johnson e Wing, 2015).

As anomalias em $\Delta foF2$ evidenciam a sensibilidade da frequência crítica às variações locais da densidade eletrônica e à configuração da EIA). Em localidades próximas à crista sul da EIA (caso típico do sudeste do Brasil), aumentos diurnos de $\Delta foF2$ indicam fortalecimento do campo leste de origem

Sq/EEJ, que intensifica a deriva ascendente no equador magnético, exporta plasma e enriquece as cristas por difusão ao longo das linhas de campo. Por outro lado, reduções noturnas de Δf_oF2 podem decorrer da combinação de campo oeste e recombinação acelerada em altitudes menores, além de depleções associadas a bolhas de plasma e Spread-F após o pôr-do-sol, que reduzem a densidade local e impactam a propagação rádio. Esses mecanismos podem explicar tanto a fase quanto a amplitude dos desvios observados e estão de acordo com estudos prévios sobre a variabilidade de baixa latitude (Mendonça, 2013).

Os resultados obtidos reforçam a necessidade de monitoramento contínuo da ionosfera em baixas latitudes, especialmente nas regiões influenciadas pelo eletrojato equatorial e pela Anomalia de Ionização Equatorial. A integração entre parâmetros ionosféricos ($h'F$, $hmF2$, e f_oF2) e índices geomagnéticos (Sym-H) permite distinguir variações diurnas de origem eletrodinâmica, como Sq, EEJ e PRE, de perturbações associadas ao acoplamento magnetosférico, como PPEFs e DDEFs. O uso de ionossondas digitais, como a CADI, combinado a rotinas automatizadas de extração de traços e cálculo de desvios em relação a dias calmos, capta mudanças rápidas na estrutura da camada F. Esse fluxo observacional melhora o *nowcasting* e o *forecasting* ionosférico e contribui para mitigar impactos em comunicações em HF, posicionamento GNSS e serviços que dependem de navegação por satélite.

Conclusão

Este estudo caracterizou a variabilidade ionosférica em São José dos Campos ao longo de agosto de 2017, evidenciando a atuação conjunta de forçantes solares, geomagnéticas e eletrodinâmicas de baixa latitude na dinâmica da camada F. Os parâmetros f_oF2 , $hmF2$ e $h'F$ exibiram ciclos diurnos compatíveis com a literatura, porém modulados pela posição da estação em baixa latitude e pela proximidade da EIA, o que altera amplitude e fase dos máximos diurnos. As anomalias calculadas mostraram que, mesmo sob condições nominalmente calmas, ocorrem desvios relevantes, apontando para a influência de ventos neutros e marés atmosféricas na condução elétrica e no transporte ao longo das linhas de campo fatores que devem ser incorporados a modelos de previsão.

A detecção de flutuações em Δf_oF2 e episódios de ausência e atenuação noturna de ecos é consistente quando não atribuível a lacunas instrumentais com irregularidades pós-pôr-do-sol e ocorrência de Spread-F, reforçando a complexidade dos mecanismos de geração em baixa latitude. Esses resultados têm implicações diretas para comunicações em HF e para o desempenho de GNSS, uma vez que variações de densidade eletrônica e estruturas deplegadas degradam a propagação e a qualidade do posicionamento. A ionossonda CADI mostrou-se eficaz para captar tais variações; ainda assim, a integração com dados complementares TEC de receptores GNSS, magnetômetros (EEJ/ ΔH), e observações de satélite tende a melhorar a separação entre efeitos locais e globais e a alimentar modelos (empíricos ou de primeira-princípios) para um *nowcasting/forecasting* mais robusto.

Referências

- BARTELS, J., 1949. **The standardized index, Ks, and the planetary index, Kp**, IATME Bull. 12b, 97-120.
- BERGIN, Aisling. *et al.* **Extreme event statistics in Dst, SYM-H, and SMR geomagnetic indices**. Space Weather, v. 21, n. 3, p. e2022SW003304, 2023.
- DAVIES, Kenneth. **Ionospheric radio**. Iet, 1990.
- HARGREAVES, John Keith. **The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace-the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere, and magnetosphere**. Cambridge university press, 1992.
- Johnson, J. R., and S. Wing (2015). **The dependence of the strength and thickness of field-aligned currents on solar wind and ionospheric parameters**. J. Geophys. Res. Space Physics, 120, 3987–4008. doi: 10.1002/2014JA020312.

KELLEY, M. C. **The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics**. 2. ed. Amsterdam: Academic Press, 2009. (International Geophysics Series, v. 96). p. 226.

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.

MENDONÇA, Marco Aurelio Moraes de. **Investigação da cintilação ionosférica no Brasil e seus efeitos no posicionamento por GNSS**. 2013.

OLIVEIRA, Virgínia Klausner de; FAGUNDES, Paulo Roberto. **Estudo da ionosfera sobre São José dos Campos durante o período de atividade solar máxima, anos 2000 e 2001**. São José dos Campos – SP.

PEZZOPANE, Michael; PILLAT, Valdir Gil; FAGUNDES, Paulo Roberto. **Automatic scaling of critical frequency fo F2 from ionograms recorded at São José dos Campos, Brazil: a comparison between Autoscala and UDIDA tools**. Acta Geophysica, v. 65, n. 1, p. 173-187, 2017.

PILLAT, Valdir Gil; GUIMARÃES, Lamartine Nogueira Frutuoso. **Identificação do Perfil da Ionosfera Utilizando Lógica Nebulosa: Parte I**.

Disponível em: <https://doi.org/10.5540/tema.2014.015.01.0047>. Acessado em: 07 ago. 2025.

PIGGOTT, W. R.; RAWER, K. (Ed.). **Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction**. 2. ed. Report UAG-23, World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Warsaw: U.R.S.I. Commission III, Nov. 1972.

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.

RISHBETH, H.; MOFFETT, R. J.; BAILEY, G. J. **Continuity of air motion in the mid-latitude thermosphere**. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, v. 31, n. 8, p. 1035-1047, 1969.

WORLD DATA CENTER FOR GEOMAGNETISM, KYOTO. **Kp Index**. Kyoto University. Disponível em: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html>. Acesso em: 9 ago. 2025.

YAMASHITA, Cristina Sayuri. **Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude**. 2000. 17f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP) pela infraestrutura de pesquisa. Agradecemos especialmente à Prof^a. Dr^a. Virginia Klausner e ao Prof. Dr. Valdir Gil Pillat pela orientação técnica e valiosas contribuições metodológicas. Reconhecemos o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através da bolsa PIBIC Nº 138157/2024-3. Às nossas famílias e amigos, nosso profundo reconhecimento pelo apoio incondicional durante a execução deste trabalho.