ANÁLISE COMPARATIVA DAS COMPONENTES *H* E *Z* DAS ESTAÇÕES MED E STM DURANTE A TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA DE OUTUBRO DE 2024

Bruno Alexandre Holanda de Lima Silva, Paulo Roberto Fagundes, 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, bru.alex1811@gmail.com, fagundes@univap.br, valdirgp@univap.br.

Resumo

Este estudo analisa as componentes horizontal (*H*) e vertical (*Z*) do campo geomagnético nas estações MED (Medianeira, Paraná) e STM (Santarém, Pará) durante a tempestade de 10 e 11 de outubro de 2024. Os dados foram processados pela ferramenta UMAGDA, desenvolvida em Python para padronização, análise e visualização magnetométrica. Como referência, utilizaram-se os dez *International Quietest Days* de outubro de 2024, com cálculo da média e do desvio padrão para as componentes *H* e *Z*, expressas em nanotesla (nT). Os dias perturbados foram comparados às respectivas faixas de referência e ao índice *Dst*. Em 10/10, os aumentos das amplitudes das componentes *H* e *Z* foram de 191,1% e 107,7% na MED e de aproximadamente 346,9% e 127,3% na STM. Em 11/10, ambas as estações permaneceram perturbadas, com recuperação gradual da componente *H*. O *Dst* atingiu mínimo provisório de aproximadamente -333 nT. Os resultados evidenciam diferenças na magnitude das perturbações entre as estações e demonstram a aplicação da UMAGDA na comparação entre períodos calmos e perturbados.
Palavras-chave: Campo Geomagnético; Tempestade Geomagnética; Índice *Dst*; Clima Espacial.

Área do Conhecimento: Ciências Exatas e da Terra - Astronomia.

Introdução

A ionosfera é uma região ionizada da atmosfera terrestre, situada aproximadamente entre 60 e 2000 km de altitude, cuja dinâmica é influenciada pela radiação solar e pelo acoplamento com a magnetosfera (CARMO, 2018; CAZUZA, 2014). Uma tempestade geomagnética corresponde a uma perturbação significativa da magnetosfera terrestre, associada à transferência eficiente de energia do vento solar para o ambiente espacial próximo à Terra (NOAA, 2026). Esse processo é favorecido pela presença de estruturas interplanetárias com componente do campo magnético orientada para o sul (Bs) de forma intensa e persistente. Nessas condições, ocorre maior acoplamento com o campo magnético terrestre, favorecendo a reconexão magnética e a transferência de energia do vento solar para a magnetosfera, o que contribui para o desenvolvimento das perturbações geomagnéticas (GONZALEZ et al., 1994 apud MELO, 2024).

Em baixas latitudes e região equatorial, as componentes *H* e *Z* registradas por magnetômetros refletem a contribuição de diferentes sistemas de correntes, incluindo efeitos associados ao eletrojato equatorial (RASTOGI, 2004). O índice *Dst* (*Disturbance Storm Time*) é utilizado para caracterizar a intensidade das tempestades geomagnéticas, sendo obtido a partir da variação média da componente horizontal (*H*) do campo geomagnético em observatórios localizados próximos à região em baixas latitudes. Durante uma tempestade, pode ocorrer inicialmente um aumento súbito do campo magnético, associado à chegada de uma estrutura de choque interplanetária. Em seguida, o *Dst* apresenta uma queda acentuada, caracterizando a fase principal da tempestade. Posteriormente, inicia-se a fase de recuperação, inicialmente mais rápida e, em seguida, mais lenta, até que o campo geomagnético retorne gradualmente às condições anteriores ao evento (KIVELSON; RUSSELL, 1995; GONZALEZ et al., 1994 apud MELO, 2024).

Em 10 e 11 de outubro de 2024 ocorreu uma tempestade geomagnética intensa, atingiu um *Kp (Planetarisches Kennziffer ou Índice Planetário K)* máximo oficial de 8+ (G4) e valores de *Dst* ≈ -333 nT (IMAJO, 2024). O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento das componentes *H* e *Z* do campo geomagnético nas estações MED (Medianeira, Paraná) e STM (Santarém, Pará), comparando os registros dos dias perturbados com as respectivas referências de dias geomagneticamente calmos e

com a evolução do índice *Dst*. A análise busca identificar diferenças na magnitude e na evolução temporal das perturbações observadas nas estações MED e STM durante o evento de 10 e 11 de outubro de 2024.

Metodologia

A ferramenta computacional UMAGDA (*Univap Magnetometer Data Analysis*) foi utilizada para organizar, padronizar, processar e visualizar dados magnetométricos das redes EMBRACE/INPE e INTERMAGNET. Neste trabalho, os resultados apresentados correspondem às estações MED e STM da rede EMBRACE/INPE. O código identifica diretamente a coluna da componente horizontal (*H*) e, quando indisponível, calcula-a a partir das componentes vetoriais (*X*) e (*Y*) pela relação $H = \sqrt{X^2 + Y^2}$, enquanto a componente vertical (*Z*) é extraída diretamente dos arquivos originais.

Como referência do comportamento geomagnético, foram utilizados os dez *International Quietest Days (Q-days)* de outubro de 2024, determinados oficialmente pelo GFZ *Helmholtz Centre for Geosciences* a partir do índice *Kp*: 01, 02, 03, 05, 13, 14, 17, 20, 21 e 25 de outubro de 2024. A classificação é obtida por meio da soma dos oito valores diários de *Kp*, da soma de seus quadrados e do maior valor de *Kp* registrado em cada dia. Para cada instante t, calculou-se a média dos dias calmos ($\overline{x}(t)$) e o respectivo desvio padrão ($\sigma(t)$) conforme as equações:

$$\overline{x}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i(t)$$

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} [x_i(t) - \overline{x}(t)]^2}{N}}$$

Onde $N = 10$. A faixa de variação de referência foi estabelecida pelo intervalo $\overline{x}(t) \pm \sigma(t)$. Os gráficos comparam essa referência aos dados brutos de *H* e *Z* dos dias perturbados de 10 e 11/10/2024. Não foi aplicada subtração de linha de base e, portanto, não foram calculadas as componentes de variação ΔH e ΔZ, por isso, neste trabalho as grandezas são apresentadas e discutidas diretamente como *H* e *Z*. A evolução global da tempestade foi avaliada com o índice *Dst* horário do *WDC for Geomagnetism*, Kyoto (IMAJO, 2024).

Resultados

A evolução temporal do índice *Dst* entre 9 e 12 de outubro de 2024 é apresentada na Figura 1. Observa-se uma redução progressiva do índice ao longo de 10/10, atingindo aproximadamente -303 nT ao final do dia. Em 11/10, o *Dst* alcançou mínimo provisório de aproximadamente -333 nT, seguido por aumento gradual dos valores ao longo das horas seguintes.

Figura 1 - Evolução do índice *Dst* entre 9 e 12 de outubro de 2024.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor a partir de dados do *WDC for Geomagnetism*, Kyoto (IMAJO, 2024).

Para caracterizar quantitativamente o comportamento geomagnético registrado nas estações MED e STM, os valores das componentes *H* e *Z* observados nos dias 10 e 11/10/2024 foram comparados

com os dez *International Quietest Days* de outubro de 2024 utilizados como referência. A Tabela 1 apresenta os valores mínimos, máximos e as respectivas amplitudes das componentes analisadas.

Tabela 1 - Valores mínimos, máximos e amplitudes das componentes *H* (nT) e *Z* (nT) na referência dos dias calmos e nos dias perturbados nas estações MED e STM.

Estação	Condição	Comp.	Min. (nT)	Máx. (nT)	Ampl. (nT)
MED	Dias calmos	H	17.876,10	18.000,58	124,48
		Z	-12.864,36	-12.833,84	30,52
	10/10/2024	H	17.731,70	18.094,01	362,31
		Z	-12.899,79	-12.836,39	63,40
	11/10/2024	H	17.731,70	17.867,10	135,40
		Z	-12.874,50	-12.833,09	41,40
STM	Dias calmos	H	25.778,07	26.047,73	269,66
		Z	-201,86	-168,96	32,90
	10/10/2024	H	25.087,88	26.293,01	1.205,13
		Z	-206,49	-131,70	74,79
	11/10/2024	H	25.346,50	25.862,80	516,30
		Z	-204,29	-150,19	54,10

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

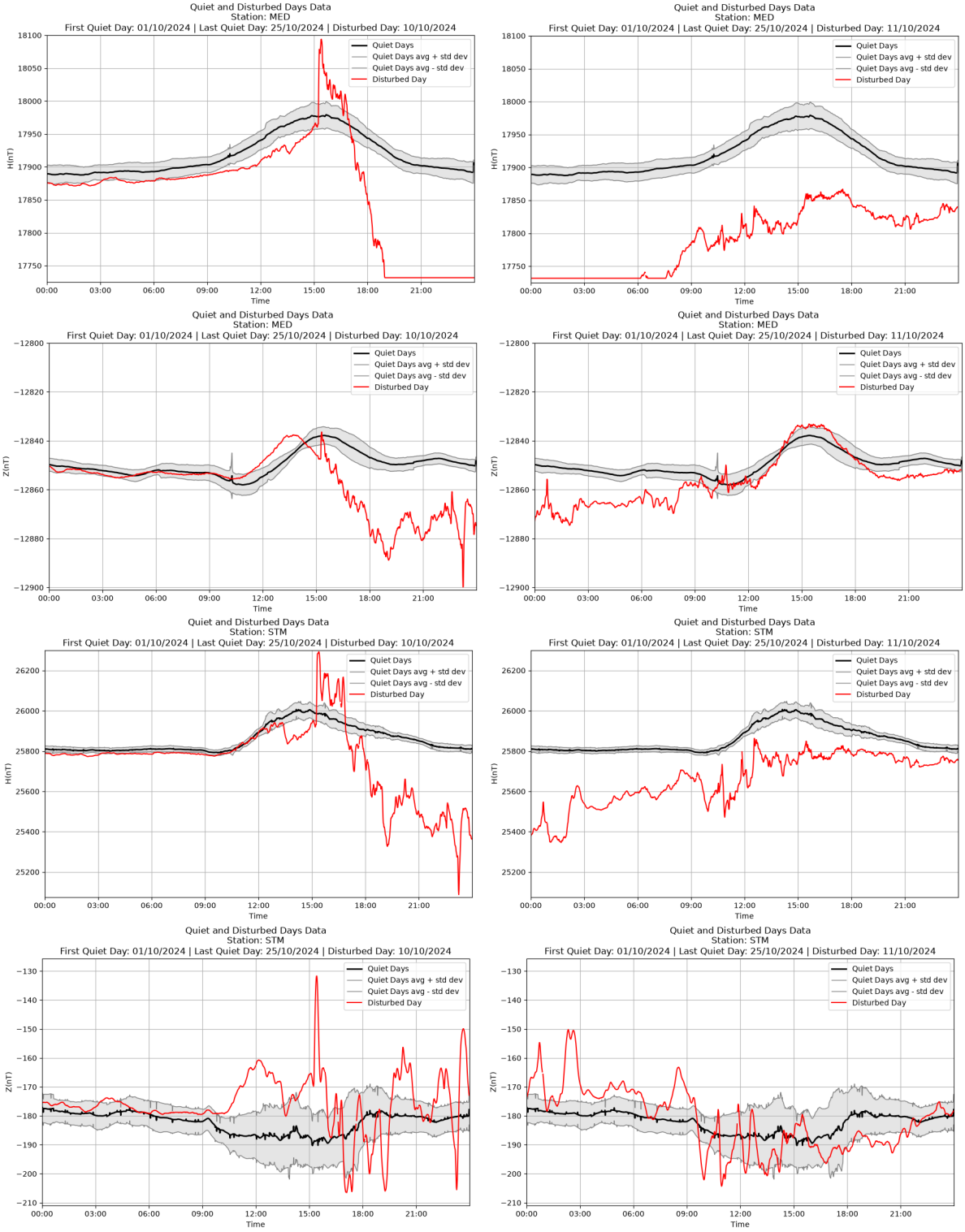
Nos dias calmos, a estação MED apresentou amplitudes de 124,48 nT para a componente *H* e 30,52 nT para a componente *Z*, enquanto na STM foram observadas amplitudes de 269,66 nT para a componente *H* e 32,90 nT para a componente *Z*. Em 10/10, a MED apresentou amplitudes de 362,31 nT para a componente *H* e 63,40 nT para a componente *Z*, correspondendo a aumentos de 191,1% e 107,7%, respectivamente, em relação à referência calma. Na estação STM, as amplitudes foram de aproximadamente 1.205,13 nT para a componente *H* e 74,79 nT para a componente *Z*, representando aumentos de cerca de 346,9% e 127,3%.

Em 11/10, a MED apresentou amplitudes de 135,40 nT para a componente *H* e 41,40 nT para a componente *Z*, equivalentes a aumentos de 8,8% e 35,7% em relação aos dias calmos. Na STM, foram observadas amplitudes aproximadas de 516,30 nT para a componente *H* e 54,10 nT para a componente *Z*, correspondendo a aumentos de aproximadamente 91,5% e 64,4%. Assim, considerando as amplitudes relativas às respectivas referências calmas, a STM apresentou variações mais acentuadas que a MED nos dois dias analisados, sobretudo na componente *H*.

A evolução temporal das componentes *H* e *Z* nas estações MED e STM é apresentada na Figura 2. Em cada painel, a linha preta representa a média dos dez dias geomagneticamente calmos para cada instante do dia, enquanto a faixa cinza é delimitada por $\bar{x}(t) \pm \sigma(t)$, correspondendo à média acrescida e subtraída de um desvio padrão. A linha vermelha representa os valores registrados nos dias perturbados de 10 e 11 de outubro de 2024, permitindo comparar o comportamento observado durante a tempestade com a respectiva referência calma de cada estação.

Figura 2 - Componentes horizontal (*H*) e vertical (*Z*) do campo geomagnético registradas nas estações MED e STM nos dias 10 e 11 de outubro de 2024. A linha preta representa a média dos dez *International Quietest Days* de outubro de 2024; a faixa cinza corresponde ao intervalo $\overline{x}(t) \pm \sigma(t)$; e a linha vermelha representa os registros dos dias perturbados. Os quatro painéis superiores correspondem à estação MED e os quatro inferiores à estação STM. Para cada estação, a componente *H* é apresentada acima da componente *Z*, sendo os

resultados de 10/10 mostrados à esquerda e os de 11/10 à direita.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Figura 2 mostra que, em ambas as estações, os maiores afastamentos em relação às respectivas referências ocorreram durante 10 e 11/10. Na MED, a componente *H* apresentou forte redução após uma elevação em 10/10 e permaneceu predominantemente abaixo da referência em 11/10, enquanto a componente *Z* apresentou desvios principalmente na segunda metade de 10/10 e oscilações em 11/10. Na STM, as componentes *H* e *Z* apresentaram oscilações mais acentuadas a partir da tarde de

10/10, com valores acima e abaixo da faixa dos dias calmos. Em 11/10, a componente *H* permaneceu majoritariamente abaixo da referência e apresentou recuperação gradual, enquanto a componente *Z* exibiu variações expressivas ao longo do dia, com tendência de aproximação à referência nas horas finais.

Discussão

Os resultados evidenciam alterações nas componentes H e Z registradas nas estações MED e STM durante a tempestade geomagnética de 10 e 11 de outubro de 2024. Em 10/10, as amplitudes das componentes *H* e *Z* na MED foram de 362,31 nT e 63,40 nT, correspondendo a aumentos de 191,1% e 107,7%, respectivamente, em relação à referência dos dias calmos. Na STM, os aumentos relativos foram de aproximadamente 346,9% para a componente *H* e 127,3% para a componente *Z*. Considerando a amplitude de cada componente em relação à referência específica de sua estação, a STM apresentou variações proporcionalmente maiores nesse dia.

Em 11/10, observou-se comportamento distinto. Na MED, a amplitude da componente *H* foi apenas 8,8% superior à referência calma, porém seus valores permaneceram predominantemente abaixo da faixa de referência durante parte significativa do período, enquanto a componente *Z* apresentou aumento de 35,7% na amplitude. Na STM, os aumentos foram de aproximadamente 91,5% para a componente *H* e 64,4% para a componente *Z*, sendo também observado um deslocamento da componente *H* para valores inferiores à referência, seguido por recuperação gradual.

A evolução temporal das componentes apresentou correspondência com o comportamento do índice *Dst*. Em 10/10, os maiores afastamentos das componentes *H* e *Z* em relação às respectivas referências ocorreram durante o período de redução acentuada do índice. Em 11/10, após o *Dst* atingir seu mínimo provisório, observou-se recuperação gradual da componente *H* nas duas estações. Esses resultados indicam que MED e STM registraram magnitudes e evoluções temporais distintas durante o mesmo evento, com maiores aumentos relativos de amplitude observados na STM.

Entretanto, essa diferença entre as estações não permite, por si só, atribuir o comportamento observado à latitude, longitude ou a um sistema específico de correntes geomagnéticas. Como a análise foi realizada diretamente sobre as componentes *H* e *Z*, sem cálculo de ΔH e ΔZ, os resultados representam uma comparação das variações registradas em cada estação em relação à sua própria referência estatística de dias calmos. Nesse contexto, a associação com o *Dst* deve ser interpretada como uma correspondência temporal entre a evolução global da tempestade e as perturbações locais observadas, sem estabelecer uma relação causal específica.

Conclusão

A análise das estações MED e STM permitiu caracterizar quantitativamente as alterações das componentes *H* e *Z* durante a tempestade geomagnética de 10 e 11 de outubro de 2024. Em 10/10, foram observados aumentos expressivos das amplitudes em relação às respectivas referências calmas, sendo de 191,1% para a componente *H* e 107,7% para a componente *Z* na MED e de aproximadamente 346,9% e 127,3% na STM. Em 11/10, as perturbações permaneceram presentes, destacando-se o deslocamento da componente *H* para valores inferiores às referências e sua posterior recuperação gradual.

A evolução observada nas duas estações apresentou correspondência temporal com o índice *Dst*, especialmente durante a intensificação e o início da recuperação da tempestade. A UMAGDA possibilitou o processamento padronizado dos dados e a construção de referências estatísticas baseadas nos dez *International Quietest Days* de outubro de 2024, permitindo comparar quantitativamente o comportamento geomagnético registrado nas duas estações.

Os resultados indicam diferenças na magnitude das variações registradas em MED e STM durante o evento. Entretanto, com base na análise realizada, não é possível atribuir essas diferenças à localização geográfica das estações ou a mecanismos físicos específicos. As estações MED e STM representam um recorte de uma investigação mais ampla desenvolvida no âmbito da Iniciação Científica, que contempla dados de outras estações e regiões, sendo as conclusões deste trabalho restritas às duas estações aqui analisadas.

Referências

CARMO, Carolina de Sousa do. **Estudo de diferentes técnicas para o cálculo do conteúdo eletrônico total absoluto na ionosfera equatorial e de baixas latitudes.** Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018. Disponível em: www.gov.br/inpe/ptbr/area-conhecimento/posgraduacao/ges/repositorio-dearquivos/dissertacoes/dissertacao_carolina_carmo_2018.pdf Acesso em: 14 dez. 2024.

CAZUZA, Elio Pessoa. **Estudos de distúrbios ionosféricos propagantes de larga escala (LSTID'S) na região equatorial durante grandes tempestades magnéticas:** estudo de casos. 2014. 70f. Dissertação (Mestrado em Ciências Climáticas) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/20066/1/EstudosDistúrbiosIonosféricos_Cazuza_2014.pdf. Acesso em: 07 jan. 2025.

IMAJO, Shun. **Provisional Dst Index Monthly Plot and Table: October 2024. Kyoto: WDC for Geomagnetism, Kyoto, 2024.** Disponível em: https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/202410/index.html. Acesso em: 25 fev. 2026.

MELO, Jayne Alencar de**. *Caracterização das perturbações geomagnéticas na América do Sul relacionadas aos agentes interplanetários do acoplamento eletrodinâmico entre o plasma solar e a magnetosfera*.** 2024. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2024. Disponível em: http://urlib.net/8JMKD2USNNW34T/4CB9NA8. Acesso em: 03 set. 2026.

NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. **Geomagnetic Storms.** Updated at September 03, 2026, at 00:32:13 UTC. Disponível em: https://www.spaceweather.gov/phenomena/geomagnetic-storms. Acesso em: 03 set. 2026.

RASTOGI, R. G. **Electromagnetic induction by the equatorial electrojet.** Geophysical Journal International, v. 158, n. 1, p. 16–31, 2004. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2004.02128.x. Disponível em: https://academic.oup.com/gji/article/158/1/16/2023922. Acesso em: 03 set. 2026.

Agradecimentos

Expresso minha sincera gratidão à FAPESP pela concessão da bolsa de iniciação científica no processo nº. 2024/05587- 4 e projeto temático.