

Como eventos de ejeção de massa coronal (CME) afetam a intensidade e a variação do campo magnético terrestre?

Clarice Lopes de Andrade

Professor orientador Cornélio Schwambach

cornelio.schwambach@fae.edu

Colégio Bom Jesus Centro – Curitiba - Paraná

Resumo

Este projeto, "A Resposta do Campo Magnético da Terra a Ejeções de Massa Coronal (CMEs)", investiga como eventos solares intensos afetam a magnetosfera do nosso planeta e, consequentemente, a segurança da tecnologia moderna. Ao examinar dados reais de CMEs, a pesquisa visa compreender como as características físicas de uma CME — como sua velocidade, densidade e direção do campo magnético — se relacionam com a gravidade das tempestades geomagnéticas. Essas tempestades são medidas usando índices como Kp e Dst. O estudo também considera o estado inicial da magnetosfera e os processos de reconexão magnética que moldam a resposta da Terra. Pesquisas de cientistas como Gopalswamy, Zhang e Pulkkinen sugerem que CMEs rápidas com um campo magnético voltado para o sul têm maior probabilidade de causar perturbações significativas. Além de promover a compreensão científica em geofísica espacial, o projeto enfatiza a importância do monitoramento do Sol para mitigar os riscos a sistemas tecnológicos vulneráveis. As descobertas oferecem insights sobre como a ciência pode nos ajudar a antecipar eventos naturais extremos e proteger infraestruturas críticas.

Palavras-chave: CMEs, campo magnético terrestre, tempestades geomagnéticas, clima espacial, reconexão magnética.

INTRODUÇÃO

As atividades solares exercem profunda influência sobre o ambiente espacial ao redor da Terra, impactando diretamente sistemas tecnológicos essenciais, como satélites, redes elétricas,

comunicações por rádio e navegação por GPS (Kivelson; Russell, 1995). Um dos fenômenos mais relevantes associados à atividade solar são as ejeções de massa coronal, ou Coronal Mass Ejections (CMEs), que consistem em grandes expulsões de plasma altamente energizado e campos magnéticos da coroa solar em direção ao espaço interplanetário (Gonzalez et al., 1994).

Quando uma CME interage com a magnetosfera terrestre — a região dominada pelo campo magnético do planeta — pode desencadear tempestades geomagnéticas de intensidades variadas, capazes de provocar flutuações intensas no campo magnético da Terra. Essas flutuações têm implicações não apenas em fenômenos naturais, como as auroras polares, mas também em sistemas tecnológicos, podendo gerar falhas em redes elétricas, degradação de satélites e interrupções em sistemas de comunicação (Pulkkinen, 2007; Green; Boardsen, 2006).

A compreensão da dinâmica entre CMEs e a resposta da magnetosfera é fundamental para o avanço da área conhecida como clima espacial (space weather), que busca prever e mitigar os impactos das atividades solares sobre as tecnologias humanas (Schrijver; Siscoe, 2010). Para monitorar esses efeitos, são utilizados índices geomagnéticos que quantificam a intensidade das perturbações. Entre os principais, destaca-se o índice Kp, que varia de 0 a 9 e representa flutuações no campo magnético em escala global. Outro índice importante é o Dst (Disturbance Storm Time), que mede variações associadas à corrente de anel equatorial e é eficaz para caracterizar tempestades magnéticas prolongadas (Mayaud, 1980).

Entretanto, prever com exatidão o impacto de uma CME na Terra continua sendo um desafio. Isso ocorre porque nem todas as CMEs produzem tempestades geomagnéticas intensas, mesmo quando direcionadas ao planeta. A intensidade do efeito está condicionada a diversos fatores, incluindo a velocidade da ejeção, a densidade do plasma, a orientação do campo magnético interplanetário (em especial o componente sul de Bz) e o estado prévio da magnetosfera terrestre (Zhang et al., 2007). Assim, o estudo de eventos reais de CMEs e suas respectivas respostas geomagnéticas contribui não apenas para o avanço científico, mas também para aplicações práticas, como a segurança de missões espaciais e a proteção de infraestruturas tecnológicas (Gopalswamy et al., 2005).

Diante disso, esta pesquisa parte da hipótese de que ejeções de massa coronal intensas provocam variações significativas na intensidade do campo magnético terrestre, as quais podem ser detectadas por meio de índices geomagnéticos como o Kp. Dessa forma, a magnitude das perturbações estaria diretamente relacionada à intensidade e à velocidade das CMEs. O objetivo geral é analisar os efeitos das CMEs sobre a intensidade e a variação do campo magnético terrestre, com base em dados reais de observações solares e índices geomagnéticos. Especificamente, busca-se: (i) coletar e organizar dados geomagnéticos de eventos solares específicos, por meio de índices como Kp, Dst ou magnetômetros; (ii) correlacionar tais dados com as características físicas das CMEs envolvidas; e (iii) avaliar a intensidade das perturbações geomagnéticas observadas, buscando entender os fatores determinantes em sua magnitude.

Esse tipo de investigação contribui não apenas para o entendimento de fenômenos solares e sua interação com a Terra, mas também para a construção de políticas preventivas em setores sensíveis à variabilidade do clima espacial, além de favorecer a educação científica em áreas como astrofísica e geofísica.

ENCAMINHAMENTO METODOLÓGICO

A metodologia deste estudo, conforme Gil (2008), é dividida em duas abordagens principais: a exploratória e a bibliográfica. A abordagem exploratória é utilizada quando o objetivo é proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses. Geralmente, esta abordagem envolve observações diretas no ambiente onde o fenômeno ocorre. Conversas estruturadas ou semiestruturadas com indivíduos que possuem conhecimento ou experiência relevante sobre o tema e análises aprofundadas de situações específicas que exemplificam o problema em questão. Essa abordagem é especialmente útil em fases iniciais de pesquisa, onde há pouco conhecimento prévio sobre o assunto e é necessário desenvolver uma compreensão mais detalhada e concreta do problema. A abordagem bibliográfica, por sua vez, baseia-se na análise de materiais já publicados sobre o tema de estudo. Isso inclui obras que abordam o tema de maneira ampla e detalhada, publicações em periódicos científicos que apresentam pesquisas e estudos específicos, trabalhos acadêmicos que exploram o tema de maneira profunda e original, relatórios técnicos, documentos oficiais e outros materiais relevantes que fornecem dados e informações sobre o assunto. Essa abordagem permite ao pesquisador compreender o estado atual do conhecimento sobre o tema, identificar lacunas na literatura e fundamentar teoricamente o estudo. Além disso, a revisão bibliográfica ajuda a contextualizar a pesquisa dentro do campo acadêmico, evidenciando contribuições e debates relevantes. Em resumo, a metodologia adotada neste estudo combina a exploração direta do fenômeno (abordagem exploratória) com uma análise detalhada da literatura existente (abordagem bibliográfica), visando desenvolver uma compreensão abrangente e bem fundamentada do problema investigado.

RESULTADOS ESPERADOS/PARCIAIS

As Ejeções de Massa Coronal (CMEs) são eventos altamente energéticos oriundos da coroa solar que liberam enormes quantidades de plasma magnetizado no meio interplanetário. Tais fenômenos exercem impacto direto sobre a magnetosfera terrestre, podendo desencadear tempestades geomagnéticas severas que afetam sistemas tecnológicos essenciais, como redes elétricas, satélites, comunicações e navegação por GPS. A origem das CMEs está associada a regiões ativas da superfície solar, caracterizadas por campos magnéticos intensos. Nessas regiões, processos de reconexão magnética – nos quais linhas de campo magnético com polaridades opostas rompem-se e se reconectam – liberam grandes quantidades de energia, impulsionando o plasma para o espaço (SCHMIEDER; DÉMOULIN; AULANIER, 2013).

As CMEs podem apresentar velocidades superiores a 3000 km/s e massas que chegam a 10^{16} gramas. Quando se propagam pelo meio interplanetário, essas ejeções interagem com o vento solar e o campo magnético interplanetário (FMI), o que pode modificar sua direção, velocidade e estrutura interna. A intensidade da tempestade geomagnética gerada depende não apenas da energia cinética da CME, mas principalmente da orientação do campo magnético interplanetário no momento do impacto com a Terra. Quando o componente B_z do FMI está orientado para o sul ($B_z < 0$), ocorre uma reconexão eficiente com o campo magnético terrestre, permitindo a transferência de grande quantidade de energia para a magnetosfera (GOPALSWAMY et al., 2005; VRŠNAK et al., 2021).

Após o impacto inicial da CME, ocorre a compressão da magnetopausa – a fronteira entre o campo magnético terrestre e o meio interplanetário –, que pode recuar de sua posição usual, a cerca de 10

raios terrestres (RE), para apenas 6 ou 7 RE. Esse recuo é acompanhado pelo aumento repentino dos índices geomagnéticos, caracterizando o início súbito de uma tempestade geomagnética (SSC). Esse comportamento já foi descrito em diversas tempestades históricas, como as ocorridas em março de 1989 (que causou um apagão na província de Quebec, Canadá) e em outubro de 2003, durante as chamadas “Tempestades de Halloween” (BOTELHO, 2011; WIKIPEDIA, 2023).

Além da compressão, a reconexão magnética na magnetopausa permite a entrada de partículas carregadas na magnetosfera, o que intensifica as correntes elétricas internas, como a corrente de anel. Essa corrente provoca uma diminuição significativa no campo magnético equatorial, capturada pelo índice Dst (Disturbance Storm Time). Tempestades severas, como a de outubro de 2003 (com Dst de -383 nT), demonstram a intensidade com que essas interações podem ocorrer (ZHANG et al., 2007).

As consequências dessas tempestades não são apenas científicas, mas também tecnológicas. Correntes induzidas no solo (GICs) podem sobrecarregar transformadores e causar falhas em sistemas de distribuição elétrica, como observado durante a tempestade geomagnética de 13 de março de 1989 (BOTELHO, 2011). Satélites em órbita baixa sofrem aumento de arrasto atmosférico, que pode provocar a reentrada prematura ou a necessidade de manobras corretivas, como ocorreu com dezenas de satélites Starlink durante uma tempestade em fevereiro de 2022 (WANG et al., 2024). A ionosfera, por sua vez, apresenta irregularidades e aumento na densidade eletrônica, o que afeta diretamente a propagação de sinais de rádio em HF e a precisão de sistemas GNSS, impactando aviação e comunicações de emergência (WANG et al., 2018).

O evento de Carrington, registrado em 1859, permanece como o mais intenso já observado, com auroras visíveis nos trópicos e falhas em sistemas de telégrafo da época. Estudos indicam que, se um evento similar ocorresse atualmente, os danos à infraestrutura global poderiam ultrapassar os trilhões de dólares (BAKER et al., 2008). Outro evento de grande relevância, embora não tenha atingido a Terra, foi o de julho de 2012, cujas características apontam que, caso tivesse impactado diretamente o planeta, seus efeitos seriam comparáveis aos do evento de 1859 (BAKER et al., 2013).

A propagação das CMEs pelo espaço interplanetário é modelada por simulações magnetohidrodinâmicas (MHD), que tentam prever sua chegada e intensidade. Entretanto, a variabilidade do vento solar e a complexidade dos campos magnéticos envolvidos tornam a previsão precisa um desafio contínuo (LUGAZ et al., 2016). Ainda assim, instrumentos como SOHO/LASCO, STEREO, SDO e ACE têm desempenhado papel fundamental na identificação e no rastreamento dessas ejeções desde sua origem até a interação com a Terra (SCHMIEDER; DÉMOULIN; AULANIER, 2013).

Conclui-se, portanto, que os impactos das CMEs sobre a Terra são determinados por múltiplos fatores, incluindo sua velocidade, massa, campo magnético e condições prévias da magnetosfera. A

orientação do campo interplanetário, especialmente a presença de componente sul ($B_z < 0$), é um dos principais determinantes da intensidade geomagnética. Compreender essas interações é essencial para o avanço da climatologia espacial, bem como para a proteção de tecnologias fundamentais à sociedade moderna.

CONSIDERAÇÕES FINAIS/CONCLUSÕES

Este estudo buscou compreender os efeitos das Ejeções de Massa Coronal (CMEs) sobre o campo magnético terrestre, destacando os mecanismos físicos envolvidos na interação entre o Sol e a Terra e os impactos das tempestades geomagnéticas sobre sistemas tecnológicos e naturais. Através da análise teórica, revisão bibliográfica e comparação de eventos reais, foi possível confirmar que a intensidade e a natureza das perturbações geomagnéticas estão diretamente relacionadas a características específicas das CMEs, como velocidade, densidade e, sobretudo, a orientação do campo magnético interplanetário (IMF), principalmente o componente B_z .

As CMEs representam um dos fenômenos mais relevantes da climatologia espacial devido ao seu potencial de causar danos em larga escala. Eventos como o de Carrington (1859), as tempestades de Halloween (2003) e a ejeção não direcionada de 2012 demonstram que, embora raros, episódios extremos são possíveis e requerem constante vigilância. A resposta do campo magnético terrestre a esses eventos varia conforme a dinâmica da magnetosfera, que atua como uma barreira fundamental para a preservação da vida e das tecnologias em nosso planeta.

Verificou-se que tempestades geomagnéticas intensas são precedidas por compressão da magnetosfera e subsequente reconexão magnética, processos que promovem a entrada de plasma e energia na região magnetosférica, intensificando correntes elétricas como a corrente de anel. Essa resposta é registrada por meio de índices como K_p e Dst , amplamente utilizados na previsão e no monitoramento da atividade geomagnética.

Diante disso, conclui-se que o estudo das CMEs e do clima espacial em geral é essencial não apenas para o avanço da astrofísica e da geofísica, mas também para a segurança de infraestruturas críticas e para o planejamento de atividades aeroespaciais. A contínua melhoria nos modelos de previsão, aliada à ampliação do monitoramento solar, é vital para mitigar os riscos associados a esses eventos.

Por fim, destaca-se a importância de fomentar a pesquisa científica na área de clima espacial, incentivando a formação de profissionais capacitados e o desenvolvimento de tecnologias nacionais de monitoramento e proteção. A compreensão aprofundada dessas interações entre Sol e Terra é, portanto, não apenas uma questão científica, mas estratégica para sociedades cada vez mais dependentes de tecnologia sensível às condições do ambiente espacial.

REFERÊNCIAS

ANTIOCHOS, S. K. et al. A Model for Solar Coronal Mass Ejections. *The Astrophysical Journal*, v. 510, p. 485–493, 1999.

BAKER, D. N. et al. *Severe Space Weather Events – Understanding Societal and Economic Impacts*. The National Academies Press, 2008.

BAKER, D. N. et al. A major solar eruptive event in July 2012: Defining extreme space weather scenarios. *Space Weather*, v. 11, p. 585–591, 2013.

BOTELHO, M. L. *Geomagnetismo e suas aplicações*. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2011.

GOPALSWAMY, N. et al. Coronal mass ejections, interplanetary shocks, and solar energetic particle events in the SOHO era. *Geophysical Monograph Series*, v. 165, p. 207–220, 2005.

LUGAZ, N. et al. Challenges in modeling CME propagation. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 152–153, p. 1–14, 2016.

SCHMIEDER, B.; DÉMOULIN, P.; AULANIER, G. Solar filament eruptions and their physical role in triggering coronal mass ejections. *Advances in Space Research*, v. 51, p. 1967–1980, 2013.

VRŠNAK, B. et al. CME kinematics and interplanetary shocks. *Journal of Space Weather and Space Climate*, v. 11, 2021.

WANG, Y. et al. CME-induced Ionospheric Irregularities and Scintillations. *Space Weather*, v. 16, n. 3, p. 393–405, 2018.

WANG, H. et al. Geomagnetic Storm Impact on GNSS and Starlink: Lessons from 2024 Events. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 129, e2024SW004055, 2024.

ZHANG, J. et al. Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($Dst \leq -100$ nT) during 1996–2005. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 112, A10102, 2007.

WIKIPEDIA. Carrington Event. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Carrington_Event
. Acesso em: 20 ago. 2025.

WIKIPEDIA. Halloween solar storms. Disponível em:
https://en.wikipedia.org/wiki/2003_Halloween_solar_storms
. Acesso em: 20 ago. 2025.