



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA COMPONENTE H DO CAMPO
GEOMAGNÉTICO DEVIDO A EVENTOS DE CHOQUE**

Victória Fernandes Do Amaral

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC/CNPq, orientado por Dr.
Ezequiel Echer e coorientado por Dr.
Manilo Soares Marques.

INPE

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

2021



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA COMPONENTE H DO CAMPO
GEOMAGNÉTICO DEVIDO A EVENTOS DE CHOQUE**

Victória Fernandes do Amaral¹

Relatório de Iniciação Científica do programa
PIBIC/CNPq.

Orientador: Prof. Dr. Ezequiel Echer².

Coorientador: Prof. Dr. Manilo Soares
Marques³.

INPE

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS

2021

¹ Aluna do curso de Geofísica da UFRN – E-mail: victoria.amaral@live.com

² Pesquisador da DIDGE/CGCEA do INPE – E-mail: ezequiel.echer@inpe.br

³ Professor do Departamento de Geofísica da UFRN – E-mail: manilo.marques@ufrn.br

AGRADECIMENTOS

A autora agradece aos orientadores Dr. Ezequiel Echer e Dr. Manilo Marques pela paciência durante o trabalho e por me incentivar a estudar a área que amo, geofísica espacial.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), ao departamento de geofísica (CCET/UFRN) e ao programa PIBIC/INPE pela oportunidade.

Agradece também ao Programa EMBRACE/INPE do MCTI, ao *ACE Data Center*, e ao *GFZ German Research Centre for Geosciences*, pelo fornecimento de dados para este trabalho.

RESUMO

Quando uma perturbação do vento solar se propaga com velocidade superior a velocidade característica do vento solar ambiente uma onda de choque se forma. Esta variação abrupta do plasma do vento solar tem efeitos significativos em magnetosferas planetárias. Para identificar a onda de choque são observadas alterações repentinas nos parâmetros do plasma, e como consequência ocorrem perturbações em correntes elétricas ionosféricas e na densidade do plasma ionosférico global. Neste trabalho serão estudados os efeitos dos choques na magnetosfera terrestre através das perturbações nas correntes elétricas ionosféricas registradas por meio de magnetômetros terrestres. Espera-se como resposta ao choque um súbito aumento na componente horizontal do campo geomagnético. Para um estudo estatisticamente relevante, o primeiro passo foi a elaboração de um algoritmo de detecção automática de choques. Usando dados do satélite ACE e a metodologia adaptada de Cash et al. (2014), foi realizada a detecção automática de choques para o ano de 2014. Este resultado é comparado a uma lista de choques identificados visualmente. A desvantagem deste método é o valor significativo de falsos positivos, uma vez que foi obtida uma lista de choques, identificados automaticamente, de 2-3 vezes maior que a lista de choques identificados visualmente. Para fins de estabelecer novos valores referenciais do plasma, de forma a identificar o choque com uma menor taxa de falsos positivos, foi utilizada a lista de choques de Justin Kasper para o ciclo solar 23. Comparando o desempenho do algoritmo de Cash et al. (2014) com o adaptado elaborado neste trabalho, a taxa de acerto e a taxa de alarme falso se demonstraram superiores. Enquanto a acurácia geral do algoritmo, com os novos parâmetros estabelecidos neste trabalho, se mostrou 55% maior. A eliminação de falsos positivos foi significativa, houve uma diminuição de 197 casos para o 23º ciclo solar. Em seguida foi detectado uma lista de choques para o ciclo solar 24, sendo 15 classificados como choques intensos. Avaliando o efeito dos choques intensos em duas estações magnetométricas para o ano de 2015 foi observado valores mais elevados na variação da componente horizontal do campo magnético para a estação de magnetômetro próximo ao centro da anomalia magnética do Atlântico Sul em relação a outra estação, assim como tempo de resposta entre 30 minutos e 60 minutos.

Palavras-chave: Choques interplanetários. Detecção automática. Campo magnético horizontal. Anomalia magnética do Atlântico Sul.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Representação de uma região de interação corotante, gerado pela interação entre os ventos lento e rápido vindos do Sol, apresentando possíveis frentes de ondas de choques frontal e reverso, bem como a zona de rarefação após a CIR.	4
Figura 2- Representação esquemática de uma CME propagando em direção a Terra e a frente de choque produzida por ela.	5
Figura 3 – Exemplo de choque identificado pelo algoritmo de detecção automática. A linha vermelha tracejada representa o momento que o choque acontece, por volta de 14h20 (UT) do dia 07 de janeiro de 2014.....	6
Figura 4 – Representação da localização do upstream (u) e downstream (d) quando identificado um choque (IP Shock).....	7
Figura 5 – Perfis de mudança dos parâmetros densidade de prótons (n), Temperatura de prótons (Tp), velocidade (v) e campo magnético total (B), indicando a classificação do choque, no canto superior a esquerda o choque rápido progressivo, a sua direita o choque.....	8
Figura 6 – Representação esquematizada (fluxograma) das etapas do algoritmo de detecção automática de choques.....	12
Figura 7 - Representação esquematizada (fluxograma) das etapas do algoritmo para avaliação do campo magnético horizontal.	16
Figura 8 - Representação esquematizada (fluxograma) das etapas do algoritmo adaptado para a identificação automática de choques.....	17
Figura 9 - Localização geográfica das estações e o mapa de contorno da intensidade do campo magnético.	20
Figura 10 - Parâmetros do plasma para a data de 22/06/2015 (a), sendo identificados dois eventos de choque interplanetário marcados pela linha pontilhada vermelha, assim como uma aproximação para o evento 01 (b) e o evento 02 (c).....	21
Figura 11 – Variação da componente H com o tempo para o evento 01, que ocorre às 04h50 do dia 22/06/2015, com os dados da estação CXP a esquerda e SMS a direita.....	22
Figura 12 – Variação da componente H com o tempo para o evento 01, que ocorre às 04h50 do dia 22/06/2015, com os dados da estação CXP a esquerda e SMS a direita.....	22
Figura 13 - Parâmetros do plasma para a data de 19/12/2015 – a esquerda, sendo identificados dois eventos de choque interplanetário marcados pela linha pontilhada vermelha, assim como uma aproximação para o evento – a direita.....	23
Figura 14 – Variação da componente H com o tempo para o choque que ocorre às 15h26 do dia 19/12/2015, com os dados da estação CXP a esquerda e SMS a direita.	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores ideais dos índices comparado aos calculados para o algoritmo adaptado neste trabalho e para o algoritmo de Cash et al (2014) em teste realizado para o ano de 2014.	18
Tabela 2 - Valores ideais dos índices comparado aos calculados para o algoritmo adaptado neste trabalho e para o algoritmo de Cash et al (2014) em teste realizado para o ciclo solar 23.	19
Tabela 3 - Informações das estações selecionadas, como coordenadas geográficas e coordenadas magnéticas para o ano de 2015.....	20

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	1
2 REVISÃO DA LITERATURA	2
2.1 O VENTO SOLAR	2
2.1.1 <i>Índice Kp</i>	2
2.1.1.1 <i>Dias geomagneticamente calmos</i>	2
2.2 ESTRUTURAS MAGNÉTICAS DO MEIO INTERPLANETÁRIO	3
2.2.1 <i>Região de Interação Corotante</i>	3
2.2.2 <i>Ejeção Coronal de Massa</i>	4
2.2.3 <i>Choques interplanetários</i>	5
2.2.3.1 <i>Classificação de choques</i>	6
2.2.3.2 <i>Velocidade do choque</i>	8
3 MATERIAL E MÉTODOS	10
3.1 IDENTIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE CHOQUES	10
3.1.1 <i>Método de avaliação do algoritmo</i>	12
3.1.2 <i>Definição de novos parâmetros para a identificação</i>	14
3.2 IDENTIFICAÇÃO DE CHOQUES INTENSOS	15
3.3 VARIAÇÃO DE H COM O TEMPO	15
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	17
4.1 PARÂMETROS PARA O ALGORITMO DE IDENTIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE CHOQUES	17
4.2 O EFEITO DE CHOQUES NO CAMPO MAGNÉTICO HORIZONTAL	19
4.2.1 <i>Os eventos de 22/06/2015</i>	20
4.2.3 <i>O evento de 19/12/2015</i>	23
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	25

1 INTRODUÇÃO

O estudo e monitoramento do ambiente geoespacial, também conhecido como clima espacial, vêm ganhando destaque ao longo dos anos devido a crescente dependência da humanidade em tecnologias sensíveis a mudanças bruscas nas condições do geoespaço. Assim, o clima espacial tenta compreender as condições da interação Sol-Terra que podem influenciar o desempenho e confiabilidade destas tecnologias. Um tipo importante de atividade solar, a Emissão de Massa Coronal (*Coronal Mass Ejection – CME*), ao viajar pelo meio interplanetário em direção à Terra pode criar descontinuidades em seus limites frontais (OLIVEIRA; SILVEIRA, 2016). Tais descontinuidades são frequentemente associadas a ondas de choque interplanetárias que envolvem a magnetosfera, podendo induzir mudanças no fluxo de partículas, no campo magnético, nos campos elétricos e na entrada de partículas energizadas provenientes do vento solar sobre uma grande região do geoespaço. Como consequência de tais eventos, podemos citar o surgimento de correntes geomagnéticas induzidas medidas na superfície da Terra, que afetam diretamente a medida horizontal do campo magnético (H).

1.1 Objetivos

O presente estudo tem como objetivo obter um algoritmo de detecção automática de choques interplanetários eficiente, e estudar o efeito desses eventos na medida do campo geomagnético horizontal, assim como a verificar influência da anomalia magnética do Atlântico Sul.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 O Vento Solar

O vento solar é definido como um fluxo de partículas eletricamente carregadas, também chamado de plasma, proveniente do Sol que preenche o espaço interplanetário. Esse plasma interage com a magnetosfera da Terra, e um dos principais efeitos observados em superfície desta relação são as auroras boreais e austrais nos polos do planeta. A intensidade desta interação depende diretamente da quantidade de manchas solares, sendo o período com mais manchas denominado de período de máxima atividade do ciclo solar, tal período ocorre aproximadamente a cada 11 anos (ECHER et al., 2006; OLIVEIRA; SILVEIRA, 2016).

2.1.1 Índice Kp

Vários índices geomagnéticos, tais como Dst, SYM-H, Kp, Ap, AL, AU e AE, são frequentemente utilizados para o estudo das atividades geomagnéticas desencadeadas por perturbações solares. Esses índices são medidos por magnetômetros no solo, localizados em diferentes latitudes da superfície terrestre, permitindo assim a identificação de uma ampla variedade de efeitos decorrentes.

Bartels, em 1949, apresentou um novo índice geomagnético, calculado a partir do grau de perturbação K em 13 diferentes estações em regiões de média e baixa latitude. O índice Kp, sigla alemã para índice planetário, é medido a cada 3 horas e descreve as perturbações no campo através de sua variação (STOLLE, 2019).

2.1.1.1 Dias geomagneticamente calmos

Para a definição dos dias geomagneticamente calmos (*quiet days*) é utilizado o índice Kp. Os dias calmos para o mês são definidos a partir da média dos seguintes valores:

- A soma de todos os valores Kp para um dia ($\sum_{i=1}^8 K_p^i$),
- a soma dos valores de Kp ao quadrado ($\sum_{i=1}^8 (K_p^i)^2$), e
- o máximo entre os 8 valores para Kp ($\max(Kp)$).

Os cinco e/ou dez dias que apresentarem os menores valores para a média representam os dias calmos (STOLLE, 2019).

2.2 Estruturas Magnéticas Do Meio Interplanetário

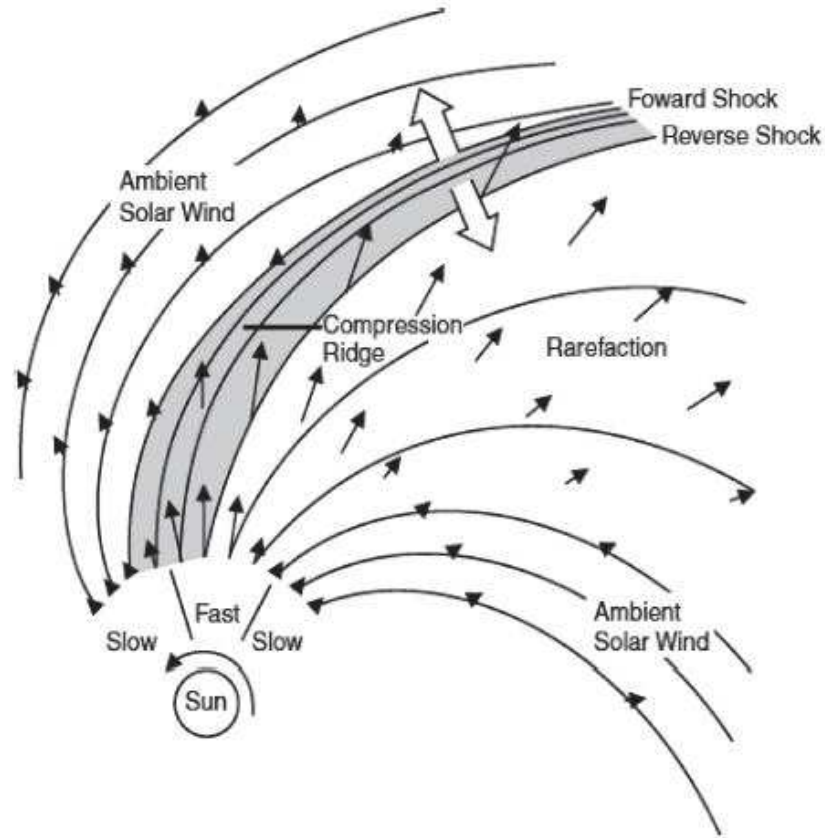
O vento solar, com seu campo elétrico e magnético, origina movimentos coletivos que percorrem o meio interplanetário, que através de interações produz estruturas como: regiões de interação corotante, ejeção coronal de massa, e ondas de choque (ECHER et al., 2006).

2.2.1 Região de Interação Corotante

Uma região de interação corotante (do inglês, *Corotating Interaction Region*, CIR) é criada pela interação do vento rápido e vento lento proveniente Sol. A existência de ventos com características rápidas e lentas ocorre devido as linhas de campo na região polar serem mais abertas permitindo um escape de partículas em maior velocidade, enquanto na região equatorial as linhas de campo são fechadas, reduzindo a velocidade do fluxo de partículas, estes feixes de vento rápido e lento seguem a forma da espiral de Parker, geometria conhecida por se assemelhar a saia de bailarina (OLIVEIRA; SILVEIRA, 2016).

A estrutura é criada quando um feixe de vento solar rápido se aproxima de um feixe de vento solar lento gerando uma região de plasma pressurizado entre eles. Tal interação acelera o vento lento e cria uma região menos densa logo após a CIR. Estas mudanças de velocidades na CIR podem ser responsáveis por gerar choques do tipo reverso e frontal. Na Figura 01 temos uma representação esquemática de uma região de interação corotante (RUSSEL, 2005; TSURUTANI et al., 2020).

Figura 1-Representação de uma região de interação corotante, gerado pela interação entre os ventos lento e rápido vindos do Sol, apresentando possíveis frentes de ondas de choques frontal e reverso, bem como a zona de rarefação após a CIR.

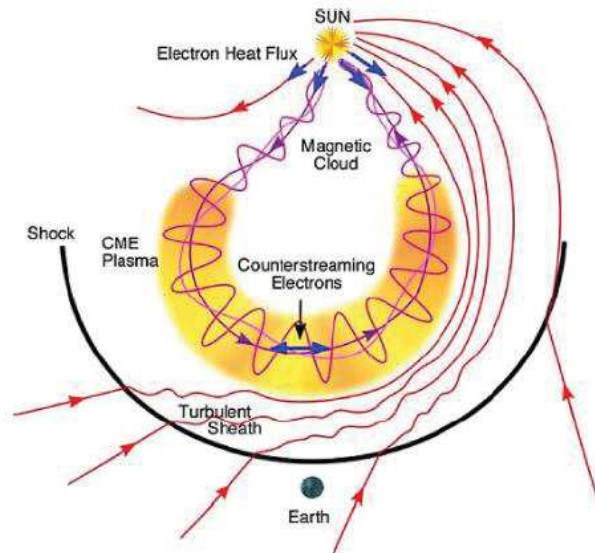


Fonte: (RUSSEL, 2005).

2.2.2 Ejeção Coronal de Massa

Uma ejeção coronal de massa (*Coronal Mass Ejection*, CME, em inglês) trata-se do desprendimento de uma grande quantidade de plasma solar situado na coroa solar, vide Figura 02 para uma representação gráfica. Esta estrutura também é conhecida por ejeção coronal de massa interplanetária (ICME) quando se propaga à Terra e outros planetas. É a causa da maior parte dos choques do tipo rápido e frontal, e responsável também pelas tempestades geomagnéticas. As CMEs podem ser classificadas como impulsivas, apresentando velocidades iniciais superiores a 750 km/s, e graduais, que acelera progressivamente, podendo atingir valores de velocidade iguais a 600 km/s (OLIVEIRA; SILVEIRA, 2016; TSURUTANI et al., 2020).

Figura 2– Representação esquemática de uma CME propagando em direção a Terra e a frente de choque produzida por ela.

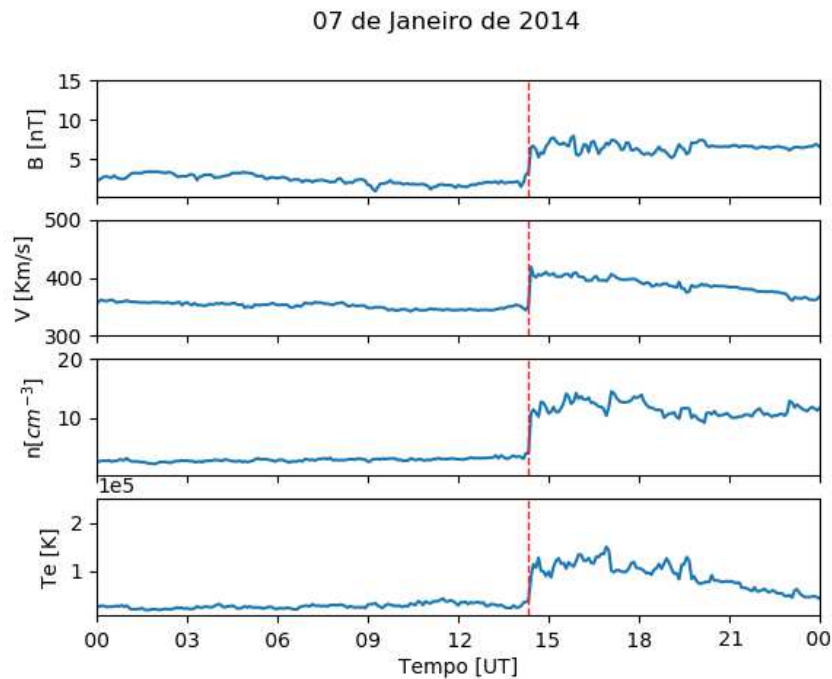


Fonte: (ZURBUCHEN; RICHARDSON, 2006).

2.2.3 Choques interplanetários

Com a declaração de Ludwig Biermann informando a existência do vento solar, I.A. Axford e P.J. Kellog, separadamente, propuseram a ideia da formação de uma onda de choque quando esse plasma proveniente do Sol chegasse à Terra, sendo o planeta um obstáculo ao fluxo do material (NIKBAKHS, 2014). Quando a velocidade do fluxo atinge valores próximos à velocidade do som ocorre a compressão da magnetosfera, o limite da frente de onda é definido como uma descontinuidade, onde os parâmetros do plasma (densidade, temperatura e velocidade) sofrem alterações repentinas (ECHER et al., 2006), como representado na Figura 03.

Figura 3 – Exemplo de choque identificado pelo algoritmo de detecção automática. A linha vermelha tracejada representa o momento que o choque acontece, por volta de 14h20 (UT) do dia 07 de janeiro de 2014.



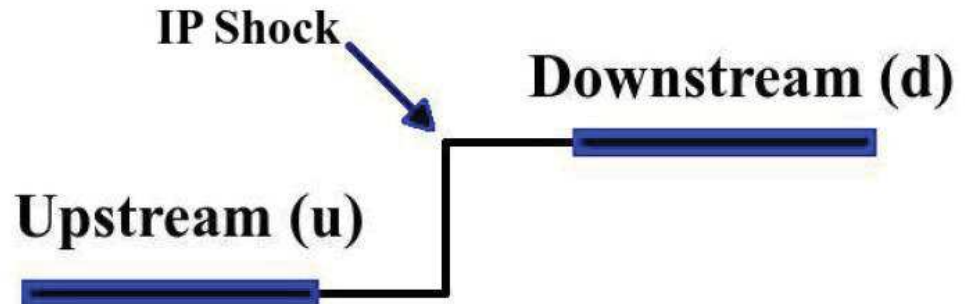
Fonte: produção do autor.

2.2.3.1 Classificação de choques

Durante o estudo de choques, um interesse recorrente é sua classificação quanto a caráter (rápido, lento, intermediário) e sentido de propagação (frontal ou reverso). O choque é considerado rápido quando sua velocidade relativa é maior que a velocidade característica de modo rápido das ondas magnetosônicas, e tipo lento quando a velocidade de propagação é maior que a velocidade característica do modo lento das ondas magnetosônicas. Em relação ao sentido de propagação, relativo ao vento solar, o choque é frontal quando se move em direção contrária ao Sol, e reverso quando propaga em direção ao Sol. Em 1 unidade astronômica (UA) o tipo mais comum é do tipo frontal rápido (ECHER et al., 2003; 2006).

Este comportamento pode ser observado nos perfis temporais dos parâmetros quando há identificação do choque. O *upstream* e o *downstream*, respectivamente os momentos pré-choque e pós-choque (Figura 04), são os indicadores visuais para classificação.

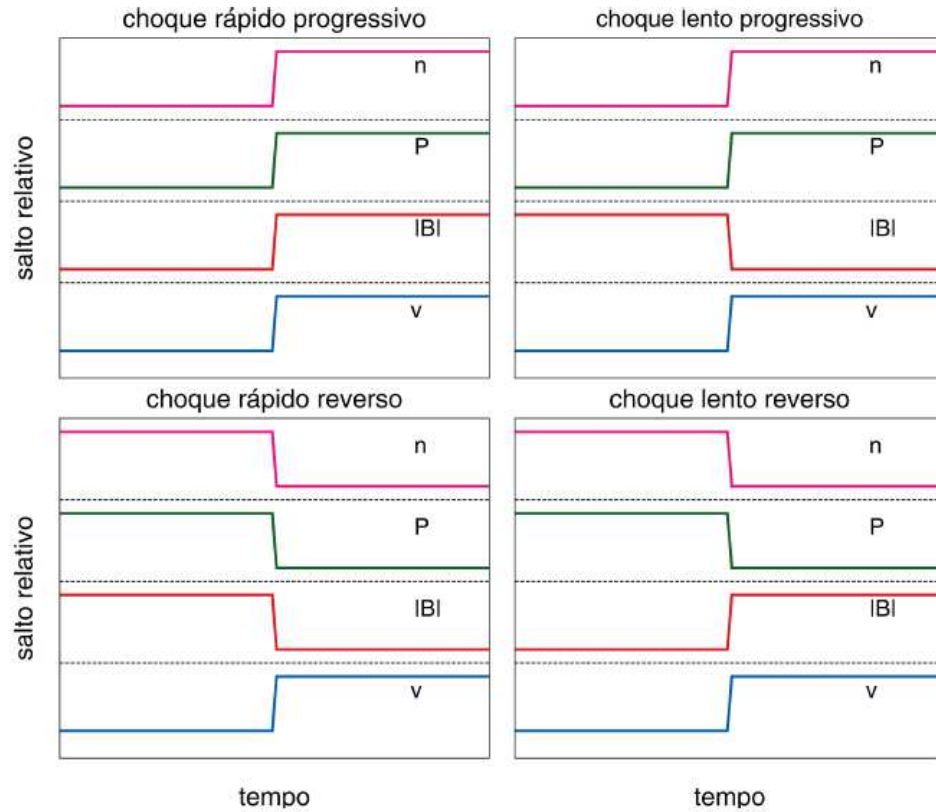
Figura 4 – Representação da localização do upstream (u) e downstream (d) quando identificado um choque (IP Shock).



Fonte: (NIKBAKHS, 2014).

Para o choque frontal/progressivo observa-se um aumento na velocidade (V), temperatura (T_p) e densidade (n), no caso de ser rápido também há um aumento no parâmetro do módulo do campo magnético ($|B|$). Enquanto para o choque reverso o salto na velocidade é positivo, para a densidade (n) e temperatura (T_p) ocorre um decaimento, no caso de ser rápido o módulo do campo também decai, e quando lento o parâmetro do campo tem uma ascensão, como observamos na Figura 05.

Figura 5 – Perfis de mudança dos parâmetros densidade de prótons (n), Temperatura de prótons (T_p), velocidade (v) e campo magnético total ($|B|$), indicando a classificação do choque, no canto superior a esquerda o choque rápido progressivo, a sua direita o choque lento progressivo, a sua direita o choque rápido reverso, a sua direita o choque lento reverso.



Fonte: (OLIVEIRA; SILVEIRA, 2016).

Outra característica muito estudada, além da classificação do choque, é o evento de sua origem. Os eventos mais comuns relacionados aos choques são as ejeções de massa coronal (CMEs) e as regiões de interação corotante (CIRs). É possível associar tipos de choque com sua origem, sendo as CMEs comumente relacionadas a choques do tipo rápido frontal, e CIRs responsáveis por pares de choques (frontal-reverso) geralmente após 1 UA, quando a CIR está bem desenvolvida.

2.2.3.2 Velocidade do choque

O cálculo da velocidade do choque pode ser descrito pela magnetohidrodinâmica, área que descreve a dinâmica do movimento do plasma, através da união das equações de Maxwell e das equações de fluidos. Esse sistema de equações também define a massa, o fluxo do

momentum, e a conservação do fluxo magnético e da energia (OLIVEIRA, 2015. p. 29; ECHER et al., 2006).

Supondo que o choque se move radialmente com direção contrária ao Sol, sua velocidade relativa ao Sol (V_s) é obtida através da velocidade do *upstream* (u_u) e *downstream* (u_d) e da equação de conservação de massa, descrita na seguinte forma:

$$V_s = \frac{\rho_d u_d - \rho_u u_u}{\rho_d - \rho_u} \quad (1)$$

Onde ρ_d e ρ_u são as densidades *downstream* e *upstream*, respectivamente.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Identificação automática de choques

São encontrados na literatura diversos modelos para a detecção automática de choques (CASH et al., 2014; KRUPAROVA et al., 2013; VOROTNIKOV et al., 2008; NEUGEBAUER et al., 2003), o algoritmo aqui apresentado tem como referência o algoritmo criado por Cash et al. (2014). Os autores comparam seu algoritmo com os demais citados através de índices (como índice de sucesso crítico, probabilidade de detecção, probabilidade de alarme falso etc.), e obtém a melhor taxa de acerto entre eles.

O algoritmo de identificação de choques fora criado com o intuito de identificar choques para uma grande quantidade de dados, como os dados utilizados neste trabalho do satélite ACE SWEPAM (disponível em <http://www.srl.caltech.edu/ACE/>) com amostragem de 64 segundos, sendo primeiramente estudado o período de máximo solar do ciclo 24, no ano de 2014.

Para a identificação dos eventos de choque serão utilizados os seguintes parâmetros do vento solar: densidade de prótons (n), temperatura de prótons (T_p), velocidade de prótons (v) e a magnitude do campo magnético ($|B|$). O choque será identificado quando houver simultaneamente uma mudança abrupto nos parâmetros.

Para a medição do começo repentino dos parâmetros foi utilizado uma janela de 10 minutos entre *upstream* e o *downstream*. Primeiramente foram pré-processados os dados para tratar valores vazios e com erros. Em seguida os dados foram reamostrados de 64 segundos para a janela de 5 minutos, de acordo com equação 02.

$$X(t) = \frac{1}{5} \sum_{i=t-4}^{i=t} X(i) \quad (2)$$

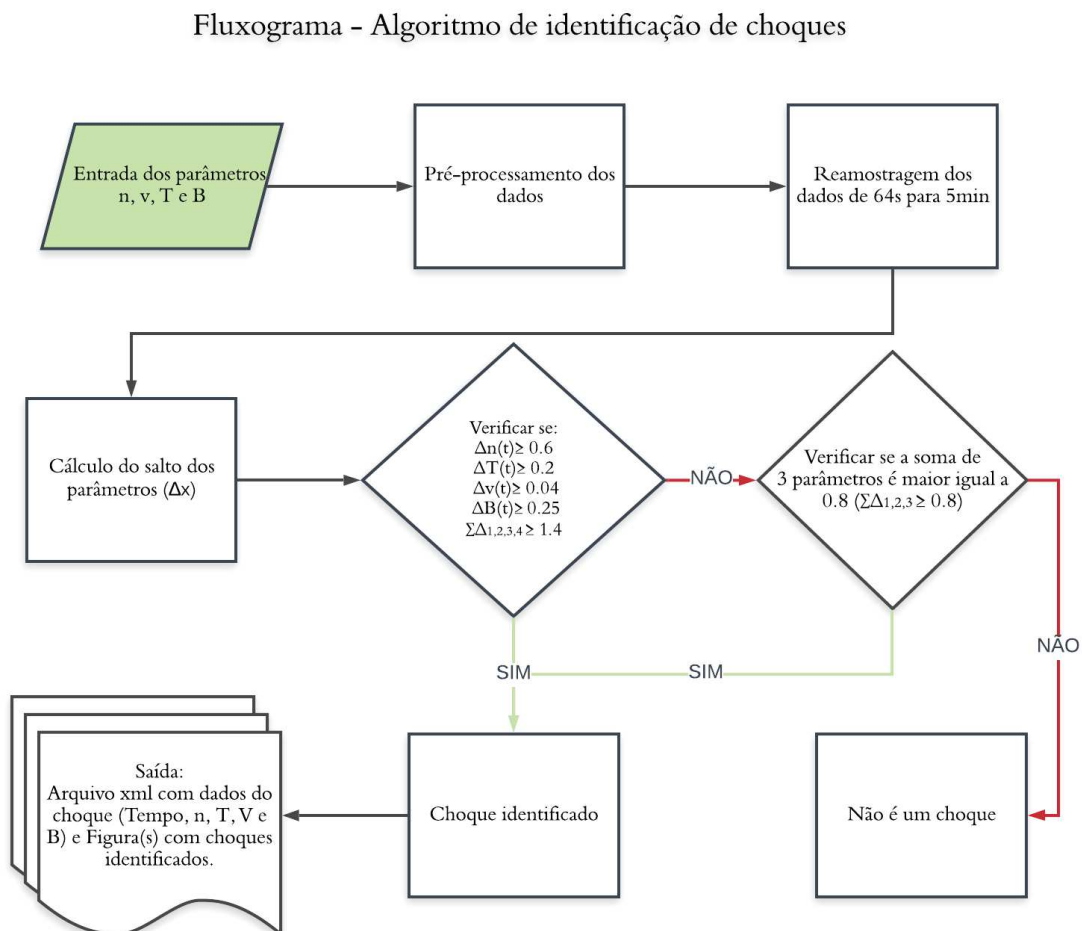
Onde $X(i)$ representa o parâmetro do vento solar a ser analisado no tempo 'i', esta equação é aplicada aos valores dos parâmetros tanto para o *upstream* quanto para o *downstream*.

Para identificar o salto repentino dos parâmetros foi calculado um valor que represente este salto, utilizando o valor médio no intervalo de 5 minutos para o *upstream* X_u e para o *downstream* X_d , na seguinte forma:

$$\Delta X(t) = \frac{X_d(t) - X_u(t)}{X_u(t)} \quad (3)$$

Caso os valores que representa o salto nos parâmetros (equação 03) correspondam a $\Delta n \geq 0,6$; $\Delta T \geq 0,2$; $\Delta v \geq 0,04$; e $\Delta B \geq 0,25$ (com a soma de 4 parâmetros maior igual a 1,4 e a soma de 3 parâmetros maior igual a 0,8), o algoritmo identifica o choque interplanetário. Em seguida, é calculado a velocidade do choque, de acordo com Echer et al. (2003), como descrito na eq. 01, quando a velocidade apresenta valores superiores a 800 km/s, o choque é determinado como rápido e para valores de velocidade entre 400 km/s e 800 km/s o choque é lento. Por fim, como resultado são gerados arquivos de imagens identificando os choques (Figura 03) e um arquivo com extensão xml com as informações de tempo de ocorrência, bem como os parâmetros utilizados em sua identificação. Uma explicação esquematizada do algoritmo pode ser vista na Figura 06.

Figura 6 – Representação esquematizada (fluxograma) das etapas do algoritmo de detecção automática de choques.



Fonte: Produção do autor.

3.1.1 Método de avaliação do algoritmo

Para avaliar o nível de sucesso do algoritmo de detecção de choques será utilizado o método de Mozer e Briggs (2003), uma adaptação do método de acurácia de previsão meteorológica aplicado a identificação de choques. Uma vez que as possíveis saídas do programa são a identificação correta do choque (*hit*), a identificação incorreta de um choque (*false positive*), e a não identificação de um choque que ocorreu (*miss/false negative*) pode-se avaliar a precisão do algoritmo de identificação automática de choques. O método contém

cinco índices que irão avaliar o sucesso, a probabilidade de detecção, a tendência de eventos (falso positivo ou falso negativo), a definição da taxa de alarmes falsos, e um índice total que inclui todos os demais (MOZER; BRIGGS, 2003; CASH et al., 2014).

O Índice de sucesso crítico (TS), também chamado de *critical success index*, é a razão entre o número de acertos pela soma no número de eventos perdidos, o número de falsos positivos e o número de acertos (Eq. 04). Em um algoritmo perfeito o índice terá valor 1.

$$TS = \frac{N_{HIT}}{N_{HIT} + N_{FALSE} + N_{MISS}} \quad (4)$$

A Probabilidade de detecção (PD) é definido pela razão entre o número de eventos encontrados pelo número real de eventos que ocorreram (Eq. 05), o valor ideal em um algoritmo perfeito será, novamente, 1.

$$PD = \frac{N_{HIT}}{N_{HIT} + N_{MISS}} \quad (5)$$

A Taxa de alarme falso (TAF) irá indicar os eventos que não ocorreram e que ainda assim foi indicado pelo algoritmo, através da razão entre o número de falsos positivos e o número de choques identificados pelo algoritmo (Eq. 06), neste caso o valor ideal será 0.

$$TAF = \frac{N_{FALSE}}{N_{HIT} + N_{FALSE}} \quad (6)$$

A Tendência de eventos (TEN) irá indicar se o algoritmo está encontrando mais falsos positivos, quando seu valor for maior que 1, ou se em sua maioria não identifica os choques, quando seu valor for menor que 1. Este índice (Eq. 07) permite detectar onde provavelmente há a maior fraqueza do algoritmo.

$$TEN = \frac{N_{HIT} + N_{FALSE}}{N_{HIT} + N_{MISS}} \quad (7)$$

Por fim, temos o índice total (TOT), ou global, que seria a soma entre a taxa de sucesso, a probabilidade de detecção e a taxa de alarme falso (Eq. 08). Onde o valor desse índice será 3 para um sistema de detecção perfeito.

$$TOT = TS + PD + (1 - TAF) \quad (8)$$

Como fora mencionado, Cash et al. (2014) utiliza estes índices para indicar o sucesso do algoritmo. Para cada um dos parâmetros, foram analisados sistematicamente diversos valores para identificar qual conjunto resultava em melhores índices, ocorreram 10.115 tentativas, tendo como resultado os seguintes valores para os índices: TS=0,29; PD=0,61, TAF=0,64 e o global (TOT) igual a 1,26.

3.1.2 Definição de novos parâmetros para a identificação

Encontramos em nossa análise que o método apresenta uma grande quantidade de choques falsos positivos com valor TEN ~ 1.39. Em virtude desse fator de erro no programa, torna-se necessário uma redefinição dos parâmetros do vento solar para a identificação do choque.

Para isto, foi utilizado a lista de choques de Justin Kasper para todo o ciclo solar 23 e calculado o valor dos saltos dos parâmetros para estes eventos. Com os números obtidos, através da equação 03, foram elaborados histogramas para cada um dos parâmetros e novos valores foram estabelecidos.

3.2 Identificação de choques intensos

Para o estudo da resposta dos efeitos no componente horizontal do campo magnético medidos na superfície terrestre foi identificado e selecionado os choques classificados aqui como intensos para o ciclo solar 24. Para tal foi elaborado um algoritmo tendo como entrada a lista de choques identificados automaticamente e os parâmetros do momento do evento de choque, assim como os parâmetros para o *upstream* e *downstream*. Com esses dados foram classificados como intensos os choques que apresentassem a razão entre o momento pós-choque e pré-choque para a densidade de prótons e para a magnitude do campo magnético superior ao valor 2, como demonstra a equação 09.

$$\frac{X_d(t)}{X_u(t)} > 2 \quad (9)$$

3.3 Variação de H com o tempo

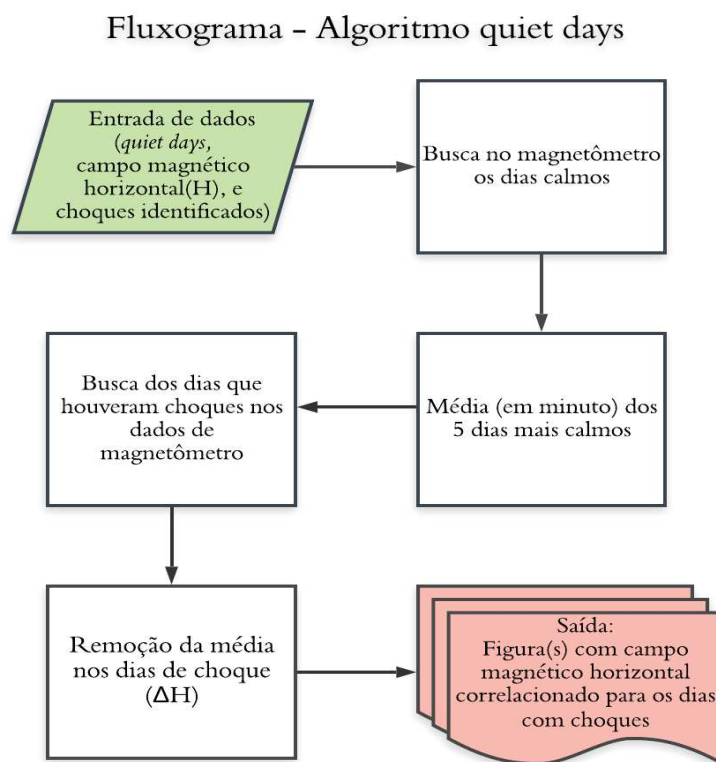
Devido a compressão na magnetosfera gerada pelo choque interplanetário campos elétricos são gerados na ionosfera, resultando em correntes elétricas ionosféricas, esse fluxo pode ser medida em solo através dos efeitos na componente horizontal do campo magnético medidos com magnetômetros (Schutz et al. (1974) *apud* Trivedi et al., 2005).

Para a análise da componente horizontal do campo magnético foi realizado o *download* dos dados de magnetômetro do programa EMBRACE/INPE. Os dados de entrada do algoritmo são os dias que houve choque, os dados de magnetômetro, e os arquivos de texto com os dias geomagnéticos mais calmos (disponível em <https://www.gfz-potsdam.de/Kp-index/>). O algoritmo se resume a diferença entre o período perturbado e calmo, calculado a

partir dos dados de magnetômetro com a média dos dias geomagneticamente calmos, para os dias de choque.

Em mais detalhes, primeiramente fora realizado a busca dos 60 dias geomagnéticos calmos, para todo o ano, entre os dados da estação, e após isso, o cálculo da média, para cada minuto, dos dias calmos para cada mês. Em seguida, foi selecionado entre os dados da estação os dias que houve choque e foi feita a remoção da média encontrada anteriormente, encontrando assim o dado ajustado para visualizar o período perturbado, que será utilizado para avaliar a influência devido aos choques e gerando imagens como saída, uma explicação esquematizada pode ser vista na Figura 07.

Figura 7 - Representação esquematizada (fluxograma) das etapas do algoritmo para avaliação do campo magnético horizontal.



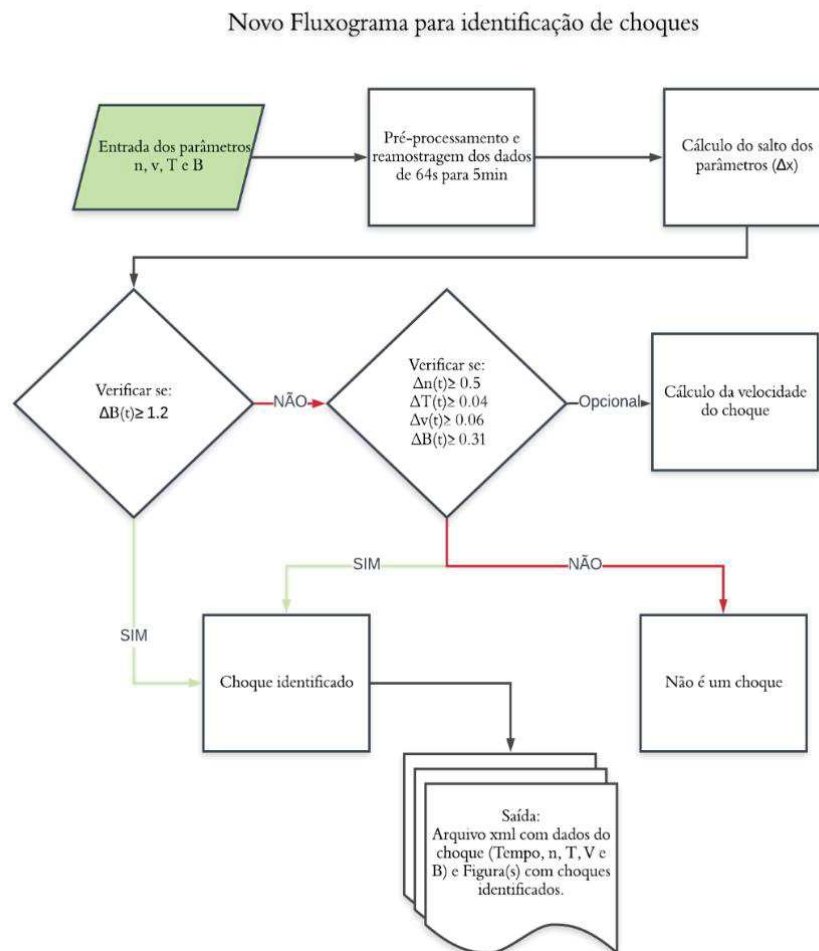
Fonte: Produção do autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PARÂMETROS PARA O ALGORITMO DE IDENTIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE CHOQUES

Como resultado dos histogramas, os parâmetros chave para identificar o choque possuem os novos valores de $\Delta n \geq 0,5$; $\Delta T \geq 0,04$; $\Delta v \geq 0,06$; e $\Delta B \geq 0,31$ quando em conjunto e de $\Delta B \geq 1,2$ quando atua sozinho. O algoritmo adaptado apresenta as mesmas etapas do anterior, somente com alteração nos números dos parâmetros do plasma, como pode ser visto na Figura 08.

Figura 8 - Representação esquematizada (fluxograma) das etapas do algoritmo adaptado para a identificação automática de choques.



Fonte: Produção do autor.

Para verificar a eficiência dos novos parâmetros primeiramente foi comparado a lista de choques do algoritmo de Cash et al (2014) e do algoritmo adaptado com uma lista de choques identificados visualmente para o ano de 2014. Os resultados do algoritmo adaptado apresentaram melhores resultados dos índices de avaliação da qualidade do método. O índice de falsos positivos foi reduzido o índice de sucesso TS aumentou significativamente. O índice TOT também foi aprimorado encontrando-se bem mais próximo do valor ideal de 3. O principal propósito para a definição de novos valores para os parâmetros do plasma é a grande quantidade de casos falsos positivos identificados. Para o ano de 2014 é possível observar a redução do índice TEN, que indica a principal deficiência do algoritmo, de 1,39 para 1,22.

Tabela 1 - Valores ideais dos índices comparado aos calculados para o algoritmo adaptado neste trabalho e para o algoritmo de Cash et al (2014) em teste realizado para o ano de 2014.

ÍNDICES					
ALGORITMO	TS	PD	TAF	TEN	TOT
Cash et al. (2014)	0,19	0,39	0,72	1,39	0,86
Algoritmo adaptado	0,45	0,69	0,43	1,22	1,72
Valor ideal	1	1	0	1	3

Fonte: Produção do autor.

Utilizando a lista de choques do ACE (disponível em http://www-ssg.sr.unh.edu/mag/ace/ACElists/obs_list.html#shocks) foi realizado a comparação também para o ciclo solar 23 (Tabela 2). Para este caso é possível observar através do índice TEN que o principal problema do algoritmo adaptado não é mais o número elevado de falsos positivos, e sim o número de eventos não detectados. Uma possível causa para a não detecção dos eventos é uma lacuna em dois ou mais parâmetros do plasma no mesmo instante de tempo. Observa-se que o valor para a probabilidade de detecção (PD) é o mesmo, pois os novos parâmetros não alteraram o valor de casos não identificados em relação aos parâmetros antigos, o que pode ser associado novamente a lacuna nos dados. Para os outros índices é observado uma melhora (vide Tabela 02), e ao comparar o índice TOT, a definição de novos parâmetros tornou o algoritmo mais eficiente.

Tabela 2 - Valores ideais dos índices comparado aos calculados para o algoritmo adaptado neste trabalho e para o algoritmo de Cash et al (2014) em teste realizado para o ciclo solar 23.

ÍNDICES					
ALGORITMO	TS	PD	TAF	TEN	TOT
Cash et al. (2014)	0,32	0,56	0,56	1,28	1,33
Algoritmo adaptado	0,50	0,56	0,18	0,68	1,88
Valor ideal	1	1	0	1	3

Fonte: Produção do autor.

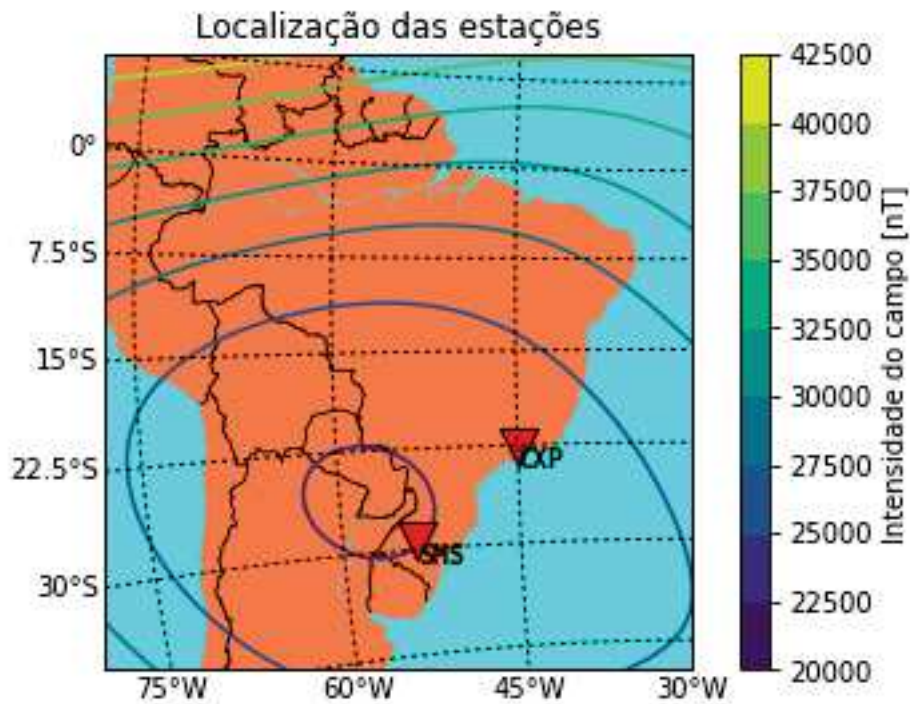
4.2 O EFEITO DE CHOQUES NO CAMPO MAGNÉTICO HORIZONTAL

Para o estudo do efeito de choques na componente horizontal do campo magnético foram identificados os choques intensos durante o período de máxima atividade solar do ciclo 24, entre os anos de 2012 e 2016. Nesse período encontraram-se 15 choques classificados como intensos.

Para a escolha das estações, toda a rede de magnetômetros do programa EMBRACE/INPE em território brasileiro foi analisado de modo que as estações tivessem valores para a latitude magnética próximos, e que fosse possível estudar a influência da anomalia magnética do Atlântico Sul (*South Atlantic magnetic anomaly, SAMA*), além da disponibilidade de dados no período selecionado.

As estações selecionadas foram as de Cachoeira Paulista (CXP) e São Martinho da Serra (SMS) para os eventos que ocorrem em 2015 (disponível em <http://www2.inpe.br/climaespacial/SpaceWeatherDataShare/>), onde a estação de São Martinho da Serra encontra-se mais próximo ao centro da anomalia magnética do Atlântico Sul. Suas localizações geográficas assim como a intensidade do campo magnético para o ano escolhido podem ser observadas na Figura 09. Para o ano de 2015 houve um choque classificado como intenso no dia 24 de outubro, porém a estação SMS tem uma lacuna nos dados nessa data, portanto, o evento não será abordado aqui. Para informações detalhadas das estações como coordenadas geográficas e geomagnéticas (calculados através de http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/coord_calc.html) vide Tabela 03.

Figura 9 - Localização geográfica das estações e o mapa de contorno da intensidade do campo magnético.



Fonte: Produção do autor.

Tabela 3 - Informações das estações selecionadas, como coordenadas geográficas e coordenadas magnéticas para o ano de 2015.

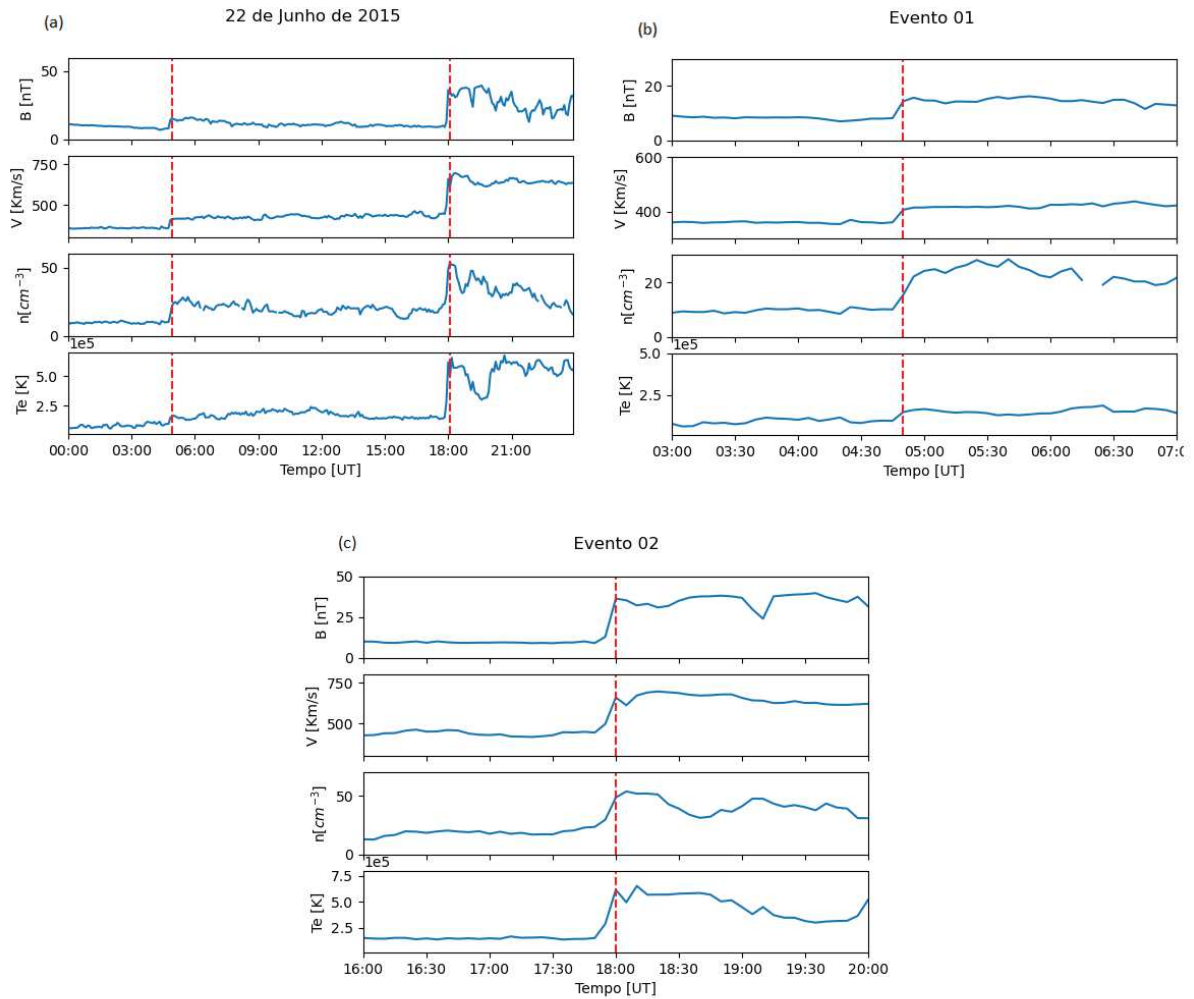
Estação	Sigla	Latitude Geográfica	Longitude Geográfica	Latitude Magnética	Longitude Magnética
Cachoeira Paulista	CXP	-22.7°	-45.01	-19.71	21.39
São Martinho da Serra	SMS	-29.44°	-53.82	-21.32	13.36

Fonte: Produção do autor.

4.2.1 Os eventos de 22/06/2015

Para a data de 22 de junho de 2015 dois choques intensos são identificados, sendo o evento 01 identificado às 04 horas e 50 minutos e o evento 02 identificado às 17 horas e 58 minutos, ambos em tempo universal (*universal time, UT*), como mostra a Figura 10.

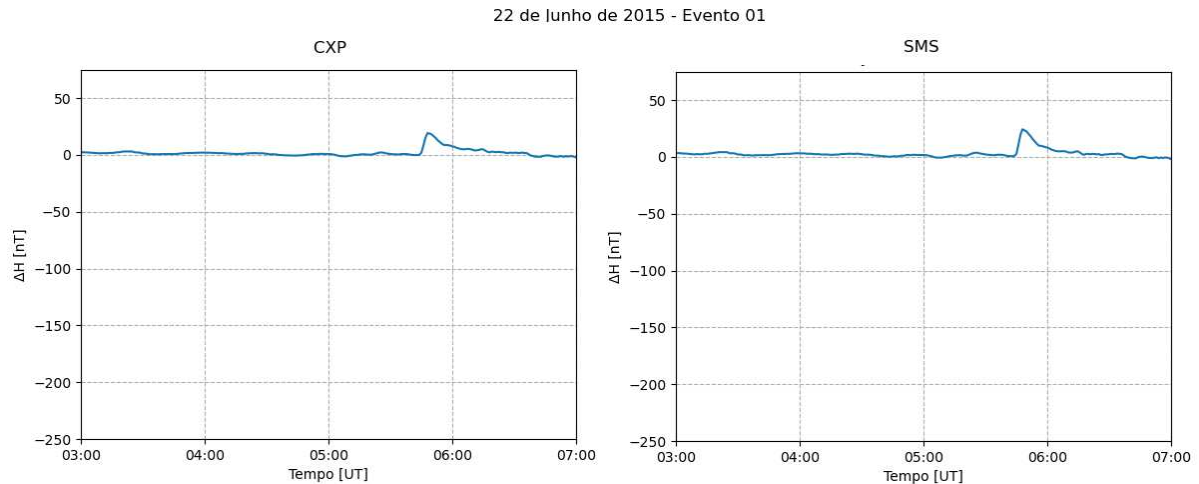
Figura 10 - Parâmetros do plasma para a data de 22/06/2015 (a), sendo identificados dois eventos de choque interplanetário marcados pela linha pontilhada vermelha, assim como uma aproximação para o evento 01 (b) e o evento 02 (c).



Fonte: Produção do autor.

Como resposta a estes eventos a estação de Cachoeira Paulista (CXP) apresentou, como esperado, um aumento súbito na componente horizontal do campo visualizado no tempo 05 horas e 44 minutos (UT) chegando ao valor máximo de ~ 19 nT para o evento 01. O tempo de resposta para ambas as estações foi de 54 minutos. E o valor máximo para a estação SMS foi de 24 nT, como é observado na Figura 11.

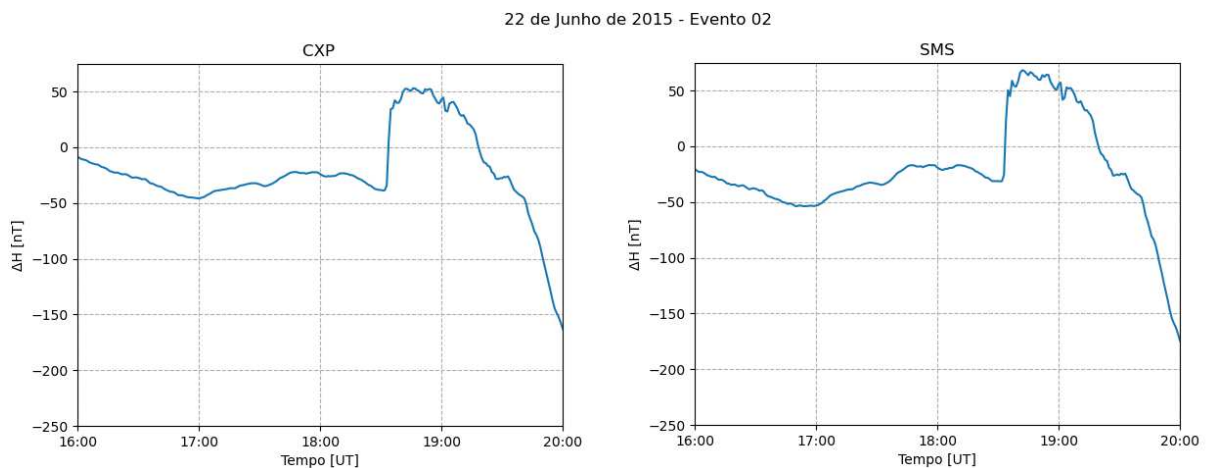
Figura 11 – Variação da componente H com o tempo para o evento 01, que ocorre às 04h50 do dia 22/06/2015, com os dados da estação CXP a esquerda e SMS a direita.



Fonte: Produção do autor.

Para o evento 02 as respostas de CXP e SMS são observadas no mesmo instante de tempo, às 18 horas e 33 minutos, ou seja, apresentam resposta 35 minutos após a identificação do choque. Em relação a variação da componente horizontal do campo CXP chega ao valor máximo de ~53 nT enquanto a estação SMS chega ao valor máximo de 68 nT, como mostra a Figura 12. Em ambos os eventos o tempo de resposta observado, assim como o valor maior na estação próximo ao centro do SAMA, estão de acordo com a literatura.

Figura 12 – Variação da componente H com o tempo para o evento 01, que ocorre às 04h50 do dia 22/06/2015, com os dados da estação CXP a esquerda e SMS a direita.

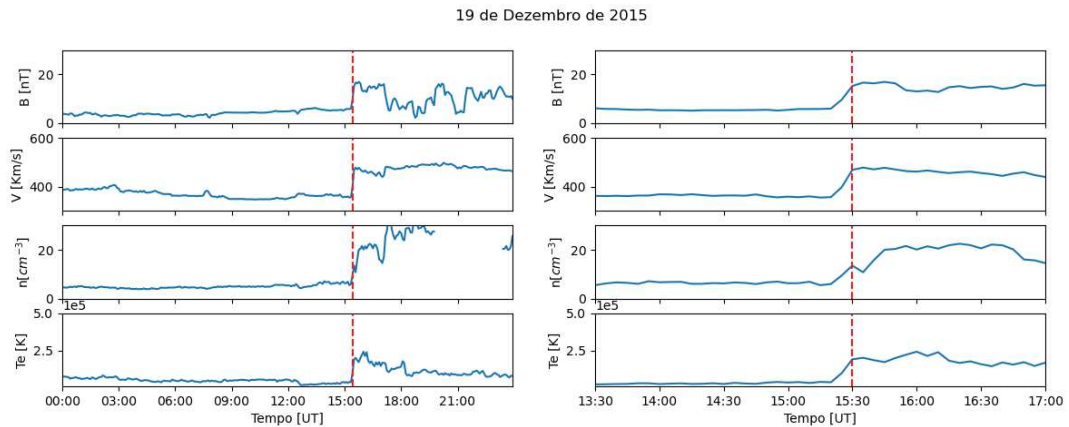


Fonte: Produção do autor.

4.2.3 O evento de 19/12/2015

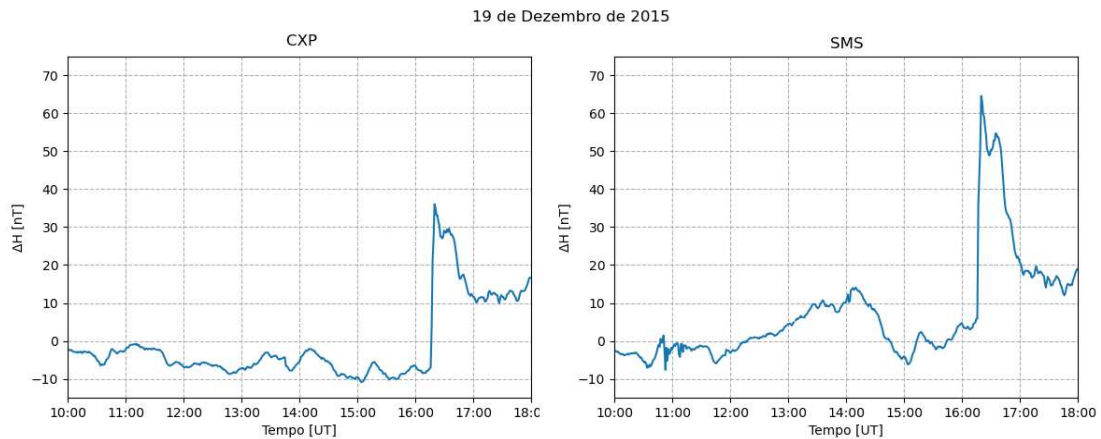
Em 19 de dezembro de 2015 às 15 horas e 26 minutos (UT) um choque intenso é identificado, como pode ser visualizado na Figura 13. Para a estação CXP o valor máximo no aumento da variação de H é de 36 nT, enquanto para a estação SMS é de 64 nT. Para as duas estações o tempo de resposta foi de 49 minutos, sendo os aumentos repentinos na componente H observados às 16 horas e 15 minutos na Figura 14. Os resultados para este evento também estão de acordo com a literatura.

Figura 13 - Parâmetros do plasma para a data de 19/12/2015 – a esquerda, sendo identificados dois eventos de choque interplanetário marcados pela linha pontilhada vermelha, assim como uma aproximação para o evento – a direita.



Fonte: Produção do autor.

Figura 14 – Variação da componente H com o tempo para o choque que ocorre às 15h26 do dia 19/12/2015, com os dados da estação CXP a esquerda e SMS a direita.



Fonte: Produção do autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em vista dos aspectos estudados foi possível criar um método de detecção automática de choques mais eficiente que aquele utilizado como base, o de Cash et al. (2014), se comparado o índice TOT para o ciclo solar 23, uma vez que o algoritmo adaptado apresenta o valor de 1,88 enquanto a versão anterior apresenta o valor de 1,33. Entretanto, ainda se faz necessário melhorias em seu desenvolvimento para resolver a quantidade de choques não identificados e as lacunas nos dados, sendo uma possível solução uma interpolação de dados rebuscada.

Considerando a análise da componente horizontal (H) do campo magnético, a resposta visual identificava é simples, resumindo-se em um salto na medida da variação de H. O tempo de resposta aos eventos de choque é entre 30 minutos e 60 minutos. Os valores da variação do componente horizontal do campo para estação São Martinho da Serra, localizado próximo ao centro da anomalia magnética do Atlântico Sul, mostra-se superior nos eventos abordados quando comparado aos valores da estação Cachoeira Paulista. Todos os resultados do estudo da componente horizontal estão coerentes com a literatura.

REFERÊNCIAS

CASH, M. D.; WROBEL, J. S.; COSENTINO, K. C.; REINARD, A. A. Characterizing interplanetary shocks for development and optimization of an automated solar wind shock detection algorithm. **J. Geophys. Res. Space Physics**, v. 119, p. 4210–4222. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2014JA019800>. Acesso em: 09 set. 2019.

ECHER, E.; GONZALEZ, W. D.; VIEIRA, L. E. A.; DAL LAGO, A.; GUARNIERI, F. L.; PRESTES, A.; GONZALEZ, A. L. C.; SCHUCH, N. J. Interplanetary Shock Parameters during Solar Activity Maximum (2000) and Minimum (1995-1996). **Brazilian Journal of Physics**, v. 33, ed. 1, p. 115-122, 2003.

ECHER, E.; ALVES, M. V.; GONZALEZ, W. D. Ondas de choque não colisionais no espaço interplanetário. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 28, n. 1, p. 51-66. 2006.

KRUPAROVA, O.; MAKSIMOVIC, M.; ŠAFRÁNKOVÁ, J.; NĚMEČEK, Z.; SANTOLIK, O.; KRUPAR, V. Automated interplanetary shock detection and its application to Wind observations, **J. Geophys. Res. Space Physics**, 118, 4793–4803, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jgra.50468>. Acesso em: 12 set. 2019.

LE, G., RUSSELL, C.T., PETRINEC, S.M., GINSKEY, M. Effect of sudden solar wind dynamic pressure changes at subauroral latitudes: changes in magnetic field. **Journal of Geophysical Research**. v. 98, 3983–3990, 1993.

MOZER, J. B.; BRIGGS, W. M. Skill in real-time solar wind shock forecasts, **J. Geophys. Res.**, 108(A6), 1262, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2003JA009827>. Acesso em: 10 set. 2019.

NEUGEBAUER, M.; STEINBERG, J. T.; TOKAR, R. L.; BARRACLOUGH, B. F.; DORS, E. E.; WIENS, R. C.; GINGERICH, D. E.; LUCKEY, D.; WHITEAKER, D. B. Genesis on-board determination of the solar wind flow regime, **Space Sci. Rev.**, 105, 661–679, 2003.

NIKBAKSH, S. **INTERPLANETARY SHOCK DATABASE**. 2014. p. 43. Dissertação (Mestrado em Física (Ciências espaciais)). Universidade de Helsinki, 2014.

OLIVEIRA, D. M. **A STUDY OF INTERPLANETARY SHOCK GEOEFFECTIVENESS CONTROLLED BY IMPACT ANGLES USING SIMULATIONS AND OBSERVATIONS.** 2015. p. 141. Tese (PhD em Física). New Hampshire Graduate School, 2015.

OLIVEIRA, D.M.; SILVEIRA, M.V.D.; Clima espacial e choques interplanetários; **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 38, n. 1, 2016.

RUSSEL, C. T.; GINSKEY, M.; PETRINEC, S.; LE, G. The effect of solar wind dynamic pressure changes on low and mid-latitude magnetic records. **Geophysical Research Letters**. v. 19, p. 1227-1230, 1992.

RUSSELL, C. T. An Introduction to the Physics of Collisionless Shocks. **AIP Conference Proceedings**. 2005. Disponível em: doi.org/10.1063/1.2032667. Acessado em: 19 ago. 2019.

STOLLE; C. **Geomagnetischer Kp-Index**. 2019. Disponível em: <https://www.gfz-potsdam.de/Kp-index/>. Acesso em: 3 nov. 2019.

TRIVEDI, N. B; ABDU, M.A.; PATHAN, B. M.; DUTRA S. L. G.; SCHUCH, N.J.; SANTOS, J. C.; BARRETO, L.M. Amplitude enhancement of SC(H) events in the South Atlantic anomaly region. **Journal of Atm. And Solar-Terrestrial Physics**, v. 67, p. 1751-1760. 2005.

TSURUTANI, B. T.; LAKHINA, G. S.; HAJRA, R. The physics of space weather/solar-terrestrial physics (STP): what we know and what the current and future challenges are. **Nonlin. Processes Geophys.** v. 27, p. 75-119, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/npg-27-75-2020>. Acessado em: 12 mar. 2020.

VOROTNIKOV, V. S., C. W. SMITH, Q. HU, A. SZABO, R. M. SKOUG, AND C. M. S. COHEN. Automated shock detection and analysis algorithm for space weather application, **Space Weather**, v. 6, S03002, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2007SW000358>. Acesso em: 12 set. 2019.

ZURBUCHEN, T. H.; RICHARDSON, I. G. In-Situ Solar Wind and Magnetic Field Signatures of Interplanetary Coronal Mass Ejections. **Space Science Reviews**, 123(1-3), 31–43. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11214-006-9010-4>. Acessado em: 19 ago. 2019.