

Rosemeire Aparecida Rosa Oliveira

**Caracterização geométrica de nuvens
magnéticas interplanetárias por meio de
experimentos computacionais**

São José dos Campos, SP

2021

Rosemeire Aparecida Rosa Oliveira

**Caracterização geométrica de nuvens magnéticas
interplanetárias por meio de experimentos
computacionais**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Doutor em Física e Astronomia.

Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos

Orientador: Prof. Dr. Arian Ojeda González

Coorientador: Prof. Dr. Valdir Gil Pillat

São José dos Campos, SP

2021

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Oliveira, Rosemeire Aparecida Rosa
Caracterização geométrica de nuvens magnéticas
interplanetárias por meio de experimentos computacionais /
Rosemeire Aparecida Rosa Oliveira; orientador, Prof. Dr. Arian
Ojeda González; co-orientador Prof. Dr. Valdir Gil Pillat. - São
José dos Campos, SP, 2021.
1 CD-ROM, 134 p.

Tese (Doutorado) - Universidade do Vale do Paraíba, São José
dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia.

Inclui referências

1. Física e Astronomia. 2. Nuvens magnéticas. 3. Análise de
variância. I. Ojeda González, Prof. Dr. Arian, orient. II.
Pillat, Prof. Dr. Valdir Gil, co-orient. III. Universidade do
Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Física e
Astronomia. IV. Título.

Eu, Rosemeire Aparecida Rosa Oliveira, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em
outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o
usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado
respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de
propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e
profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 16 de Junho de 2021.

Rosemeire Aparecida Rosa Oliveira

Autor(a) da Obra

Data da defesa: 01 / 04 / 2021

ROSEMEIRE APARECIDA ROSA OLIVEIRA

**“CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DE NUVENS MAGNÉTICAS INTERPLANETÁRIAS
POR MEIO DE EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS.”**

Tese aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

PROF. DR. ALAN PRESTES Alan Prestes

PROF. DR. ARIAN OJEDA GONZÁLEZ Arian Ojeda Gonzalez

PROF. DR. VALDIR GIL PILLAT Valdir Gil Pillat

PROF.^a DR.^a VIRGINIA KLAUSNER DE OLIVEIRA Virginia Klausner de Oliveira

PROF. DR. EZEQUIEL ECHER - INPE Ezequiel Echer

PROF. DR. MARLOS ROCKENBACH DA SILVA – INPE Marlos Rockenbach da Silva

Prof.^a Dr.^a Lúcia Vieira

Diretora do IP&D – Univap

São José dos Campos, 01 de abril de 2021.

*Dedico esse trabalho à Nossa Senhora Aparecida
ao meu esposo Marcos William, ao meu filho, Jorge,
aos meus pais, Pedro e Lourdes,
ao meu irmão e cunhada Sérgio e Larissa.*

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus e a Nossa Senhora Aparecida pelo dom da minha vida e por todas as vivências e realizações que me foram permitidas.

Ao meu esposo, companheiro e amigo, por segurar minha mão nos momentos que pensei em desistir e por me ajudar, em todos os sentidos, a continuar. Ao meu filho Jorge por ser um motor para seguir em frente e por trazer tanta alegria para o nosso lar.

Aos meus pais, irmão e cunhada por todo apoio afetivo e motivador. Mesmo sem entenderem meu trabalho e minha pesquisa estão sempre juntos comigo me ajudando e me incentivando.

Ao meu orientador Arian Ojeda Gonzalez, que é um verdadeiro pai, orienta, ajuda, cobra, pega na mão quando precisa, deixa lançar vôo e ainda brinca com meu filho. Saiba que o senhor é modelo de profissional e de pessoa para mim!

Aos professores Valdir Gil Pillat, Alan Prestes, Márcio Muella, Sérgio Pilling por todos os conhecimentos compartilhados durante as disciplinas. Em especial ao professor Valdir que aceitou ser meu coorientador e me deu todo o suporte necessário para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores da banca, Prof. Dr. Alan Prestes, Prof. Dr. Ezequiel Echer, Prof. Dr. Marlos Rockenbach e Profa. Dra. Virginia Klausner de Oliveira pela disponibilidade e contribuições com meu trabalho desde o exame de Qualificação.

Aos meus amigos e colegas do IP&D. Vocês sempre fizeram os dias mais leves e prazerosos. Em especial, agradeço ao meu amigo Caritá que abriu as portas do IP&D, me apresentou o professor Arian e se tornou parceiro de vida! Agradeço à minha amiga Kelly por me ajudar com as traduções.

*“Nem tão longe que eu não possa ver
Nem tão perto que eu possa tocar
Nem tão longe que eu não possa crer
Que um dia chego lá
Nem tão perto que eu possa acreditar
Que o dia já chegou”
(Humberto Gessinger)*

Resumo

Nuvens Magnéticas constituem de um caso particular das Ejeções de Massa Coronais Interplanetárias que são observadas no vento solar por diferentes satélites e apresentam características peculiares usadas em sua identificação. Esses eventos podem ser modelados analiticamente pelo modelo livre de força como um cilindro infinito, também chamado tubo de fluxo. Para encontrar a orientação do eixo do cilindro, o método da mínima variância (MVA) é aplicado em observações do campo magnético interplanetário. O MVA é um problema clássico de autovalores e autovetores que transforma dados medidos *in situ* em um novo sistema de coordenadas bidimensional, representando a melhor seção transversal possível do cilindro proposto pelo modelo livre de força. A aplicabilidade do MVA é tradicionalmente definida de acordo com relações entre os autovalores. No entanto, as regras de degeneração existentes na literatura são baseadas em estatísticas de erros. Além disso, os autovetores associados a estes autovalores, determinam a direção do eixo da nuvem magnética. Nesse sentido, o cálculo dos ângulos, os planos de máxima e de mínima variância e o tipo de tubo de fluxo desse novo sistema de coordenadas fica comprometido, uma vez que o método não especifica a orientação do eixo. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é relacionar o MVA e o modelo livre de força do ponto de vista geométrico. Com isso, propôs-se uma métrica capaz de medir a degeneração dos autovalores a partir da geometria do espaço de variância gerado pelo MVA. Além disso desenvolveu-se e será disponibilizado à comunidade científica um experimento computacional com interface gráfica, semi automático embasado no modelo livre de força e no método da mínima variância, a fim de sanar os problemas relacionados com o sentido dos autovetores gerados pelo MVA.

Palavras-chaves: Nuvens magnéticas. Método da mínima variância. Modelo livre de força. Degeneração. Eixo do tubo de fluxo.

Abstract

Magnetic clouds are a particular case of interplanetary coronal mass ejections that are observed in the solar wind by different satellites and have peculiar characteristics used in their identification. These events can be modeled analytically by the force-free model as an infinite cylinder, also called a flux rope. To find the orientation of the cylinder axis, the method of minimum variance (MVA) is applied in observations of the interplanetary magnetic field. MVA is a classic eigenvalue and eigenvector problem that transforms measured data *in situ* into a new two-dimensional coordinate system, representing the best possible cross section of the cylinder proposed by the force-free model. The applicability of MVA is traditionally defined according to relationships between eigenvalues. However, the degeneration rules in the literature are based on error statistics. In addition, the eigenvectors associated with these eigenvalues, determine the direction of the axis of the magnetic cloud. In this sense, the calculation of the angles, the planes of maximum and minimum variance and the type flux rope of this new coordinate system is compromised, since the method does not specify the orientation of the axis. In this context, the objective of this work is to relate the MVA and the force free model from the geometric point of view. With this, a metric capable of measuring the degeneration of the eigenvalues from the geometry of the space of variance generated by the MVA was proposed. In addition, a computational experiment with a graphical, semi-automatic interface based on the free force model and the minimum variance method was developed and will be made available to the scientific community, in order to solve the problems related to the orientation of eigenvectors generated by MVA.

Key-words: Magnetic cloud. Minimum variance analysis. Force-free model. Degeneration problem. Flux rope axis.

Lista de ilustrações

Figura 1 – As imagens em escala de cinza da esquerda para a direita são as imagens cronográficas obtidas pelos telescópios STEREO-B / SECCHI COR2, SOHO / LASCO C3 e STEREO-A / SECCHI COR2 em 04 de novembro de 2010.	38
Figura 2 – Amostra de um fluido em equilíbrio MHD sob a força gravitacional, força magnética e gradiente de pressão.	40
Figura 3 – Gráfico das componentes simuladas B_A em vermelho, B_T em azul, B_R em magenta e do módulo do campo magnético total em preto, de uma nuvem magnética.	44
Figura 4 – Representação do sistema de coordenadas de uma nuvem magnética em relação aos eixos cartesianos do sistema Sol - Terra. Observe que B_A é o eixo da hélice, ϕ está entre o eixo Ox e a projeção de B_A no plano xOy , e θ está entre a mesma a projeção de B_A e o eixo da hélice.	45
Figura 5 – O eixo do tubo de fluxo é quase paralelo ao plano de eclíptica ($ \theta \leq 45^\circ$) a componente B_z muda de sinal durante a passagem pelo satélite, caracterizando um tubo bipolar. Neste caso, tem-se os tipos de tubo SWN, SEN, NES e NWS.	46
Figura 6 – o eixo apresenta alta inclinação ($ \theta > 45^\circ$) em relação ao plano de eclíptica, a componente B_z não muda de sinal durante sua passagem pelo satélite, caracterizando um tubo de fluxo unipolar. Neste caso, tem-se os tipos de tubo WNE, ESW, ENW e WSE.	46
Figura 7 – Representação esquemática da seção transversal do modelo cilíndrico para nuvem ideal. Os vetores campo magnético B^i estão em preto e as soluções do MVA x_i em azul. O símbolo \odot indica que o vetor x_2 está saindo do plano do papel.	49
Figura 8 – Representação do <i>espaço de variância</i> como um elipsoide usando a Equação (2.52).	53
Figura 9 – Representação artística do satélite ACE. O painel (a) mostra detalhes da órbita do satélite ACE no ponto de Lagrange L1. O painel (b) é uma representação do satélite ACE com indicação dos dez instrumentos a bordo. Nesta pesquisa são utilizados apenas os dados do instrumento MAG e SWEPAM.	56
Figura 10 – Visualização de exemplo da página de <i>download</i> dos dados do satélite ACE.	57
Figura 11 – Visualização de exemplo de arquivo de dados do satélite ACE.	58

Figura 12 – Representação artística do satélite WIND (painel (a)) e indicação esquemática dos instrumentos a bordo no mesmo satélite (painel (b)).	59
Figura 13 – Visualização de exemplo da página de <i>download</i> dos dados do satélite WIND.	60
Figura 14 – Visualização de exemplo de arquivo de dados do satélite WIND.	61
Figura 15 – Fluxograma do experimento computacional de caracterização do tubo de fluxo. As etiquetas verticais indicam as informações de entrada. Cada caixa de processamento é explicada no texto da Seção 3.3. Os títulos em negrito correspondem às técnicas desenvolvidas nesta pesquisa.	66
Figura 16 – Projecção do eixo do cilindro ideal (ϕ, θ) no plano yOz do sistema de coordenadas GSE. O ângulo ω é construído conforme Tabela 9.	70
Figura 17 – Histograma (de tipo <i>Stacked</i>) $\lambda_2\lambda_3^{-1}$ para todos os eventos do catálogo RC. Em vermelho os eventos tipo <i>MC0</i> , ou seja, os ICME que não possuem nuvem magnética reportada. Em verde, <i>MC1</i> que são eventos com evidências de rotação na direção do campo, mas sem outras características de nuvens magnéticas. Em azul, <i>MC2</i> correspondente a nuvens magnéticas reportadas. A linha pontilhada corresponde ao limiar $\lambda_2\lambda_3^{-1} = 2$	74
Figura 18 – Histograma normalizada de tipo <i>stacked</i> da métrica proposta $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ aplicada em eventos classificados como (a) <i>MC2</i> , (b) <i>MC1</i> e (c) <i>MC0</i> segundo catálogo RC. As cores diferem eventos de acordo com a razão $\lambda_2\lambda_3^{-1}$, sendo vermelho para razão menor que 2 e azul, caso contrário. Em cada caso, a curva pontilhada corresponde a Gaussiana com (a) $\mu_2 = 9,4923$ e $\sigma_2 = 3,9884$, (b) $\mu_1 = 6,3736$ e $\sigma_1 = 3,5902$ e (c) $\mu_0 = 5,2384$ e $\sigma_0 = 3,1625$	75
Figura 19 – Gráfico de curvas de nível para a métrica proposta $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ e comparação com Siscoe e Suey (1972), Lepping e Behannon (1980). Para construção, $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ é calculado com $0 \leq \lambda_2 \leq \lambda_1$ e $0 \leq \lambda_3 \leq \lambda_1$, enquanto que a região $\lambda_2 < \lambda_3$ deve ser desconsiderada. Além do mais, a linha vermelha corresponde a $\lambda_2\lambda_3^{-1} = 2$ e a linha azul corresponde a $\lambda_2\lambda_3^{-1} = 1,39$ e $\lambda_2\lambda_1^{-1} = 0,73$. Nesse caso, a degeneração teórica ocorre no contorno da região triangular inferior ($\lambda_2 = \lambda_1$ ou $\lambda_2 = \lambda_3$).	77

Figura 20 – Histogramas normalizados de tipo *stacked* para a métrica proposta $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ aplicada a eventos classificados com qualidade (a) Excelente ($Q1$), (b) Boa ($Q2$) e (c) Ruim ($Q3$) segundo lista MC Wind. As cores diferenciam os eventos de acordo com a razão $\lambda_2\lambda_3^{-1}$, sendo vermelho para razão menor do que 2 e azul, maior ou igual do que 2. Em cada caso, a curva pontilhada corresponde à Gaussiana com (a) $\mu_{Q1} = 12,2439$ e $\sigma_{Q1} = 3,4673$, (b) $\mu_{Q2} = 10,4632$ e $\sigma_{Q2} = 4,0099$ e (c) $\mu_{Q3} = 9,0152$ e $\sigma_{Q3} = 4,1538$ 78

Figura 21 – Visualização da tela inicial da interface amigável desenvolvida para o experimento. A letra **A** indica a região de entrada de dados. A letra **B** indica os botões de exibição. A letra **C** indica o ambiente padrão de visualização para o Matplotlib. 80

Figura 22 – Janela do programa quando selecionado o botão “Data Set” para o período de 00 h em 29 de abril de 2001 às 13 h do mesmo dia. Nesse caso, o experimento completo é processado e no ambiente de visualização são observados oito gráficos: H^+ densidade de próton (cm^{-3}); H^+temp temperatura de prótons (K); H^e/H^+ razão entre partículas *alphas* e prótons; H^+speed velocidade de prótons (km/s); $Beta_p$ β do plasma considerando apenas prótons; $|B|$ magnitude do campo magnético (nT); B_{lat} componente latitudinal do campo magnético; B_{lon} componente longitudinal do campo magnético. 80

Figura 23 – Janela do programa ao selecionar o botão MVA Hodogram para o período das 00 em 29 de abril de 2001 às 13 do mesmo dia. Neste caso, o experimento completo é processado e são observados seis gráficos no ambiente de visualização. A primeira linha sendo os planos de variância máxima $B_T \times B_A$ ($\vec{B}_x^* \times \vec{B}_y^*$) e a segunda linha os planos de variância mínima $B_A \times B_R$ ($\vec{B}_y^* \times \vec{B}_z^*$). As colunas à esquerda e à direita correspondem aos conjuntos ideais e a central corresponde ao resultado do MVA (identificados pelas expressões *Set 1*, *Set 2* e *MVA*, respectivamente, no título dos gráficos). A área de botões é atualizada para análise visual da alteração no sinal do autovetor. 82

Figura 24	– Janela do programa ao selecionar ao botão <i>Axes Direction</i> para o período das 00 em 29 de abril de 2001 às 13 do mesmo dia. Neste caso, o experimento completo é processado e são observados seis gráficos no ambiente de visualização. Cada linha contém a magnitude do campo magnético ($ B $), suas componentes GSE (B_x, B_y, B_z) e suas componentes geográficas (B_{lat}, B_{lon}). As colunas à esquerda e à direita correspondem aos conjuntos ideais e a central corresponde ao resultado do MVA (identificados pelas expressões <i>Set 1</i> , <i>Set 2</i> e <i>MVA</i> , respectivamente, no título dos gráficos).	83
Figura 25	– Visualização de hélice idealizada em uma versão antiga da interface amigável desenvolvida.	84
Figura 26	– Quadro <i>Data Set</i> da nuvem catalogada no período: 14 h de 21 de fevereiro de 2000 às 12 h de 22 de fevereiro de 2000.	86
Figura 27	– Quadro <i>Data Set</i> da nuvem catalogada no período: 15 h de 21 de fevereiro de 2000 às 11 h de 22 de fevereiro de 2000.	86
Figura 28	– Quadro <i>Axes Directions</i> da nuvem catalogada no período: 15 h: de 21 de fevereiro de 2000 às 11 h de 22 de fevereiro de 2000.	87
Figura 29	– Quadro <i>MVA Hodogram</i> da nuvem catalogada no período: 15 h: de 21 de fevereiro de 2000 às 11 h de 22 de fevereiro de 2000.	87
Figura 30	– Quadro conjunto de dados (<i>Data Set</i>) da MC catalogada no período: 22 h de 19 de março de 2001 às 23 h de 21 de março de 2001.	89
Figura 31	– Quadro <i>MVA Hodogram</i> da nuvem catalogada no período: 22 h de 19 de março de 2001 às 23 h de 21 de março de 2001.	90
Figura 32	– Quadro <i>MVA Hodogram</i> da nuvem catalogada no período: 22 h de 19 de março de 2001 às 23 h de 21 de março de 2001.	90
Figura 33	– Quadro Direção dos eixos (<i>Axis direction</i>) da MC catalogada no período: 22 h de 19 de março de 2001 às 23 h de 21 de março de 2001.	91
Figura 34	– Quadro conjunto de dados (<i>Data Set</i>) da MC catalogada no período: 18 h de 28 de fevereiro de 2002 às 10h de 01 de março de 2002.	92
Figura 35	– Quadro conjunto de dados (<i>Data Set</i>) da MC catalogada no período: 20 h de 20 de fevereiro de 2002 às 10h de 01 de março de 2002.	92
Figura 36	– Quadro direção dos eixos (<i>Axis Direction</i>) da MC catalogada no período: 20 h de 20 de fevereiro de 2002 às 10 h de 01 de março de 2002.	93
Figura 37	– Comparação entre o plano de máxima variância padrão $B_T \times B_A$ (a) e sua rotação $-B_T \times B_A$ (b) da MC catalogada no período: 20 h de 20 de fevereiro de 2002 às 10h de 01 de março de 2002.	93
Figura 38	– MVA Hodogram modificado por $-BT$ da MC catalogada no período: 20 h de 20 de fevereiro de 2002 às 10h de 01 de março de 2002.	94

Figura 39 –Quadro conjunto de dados (<i>Data Set</i>) da MC catalogada no período: 8 h de 20 de agosto de 1998 às 18 h de 21 de agosto de 1998.	95
Figura 40 –MVA Hodogram da MC catalogada no período: 8 h de 20 de agosto de 1998 às 18 h de 21 de agosto de 1998.	96
Figura 41 –MVA Hodogram modificado por -BA da MC catalogada no período: 8 h de 20 de agosto de 1998 às 18 h de 21 de agosto de 1998.	96
Figura 42 –Quadro direção dos eixos (<i>Axis Direction</i>) da MC catalogada no pe- ríodo: 8 h de 20 de agosto de 1998 às 18 h de 21 de agosto de 1998. . .	97
Figura 43 –Quadro <i>Data Set</i> do evento 1 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 23 h de 09 de março de 2018 às 00 h de 11 de março de 2018.	117
Figura 44 –Quadro <i>Axes Directions</i> do evento 1 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 23 h de 09 de março de 2018 às 00 h de 11 de março de 2018.	117
Figura 45 –Quadro <i>MVA Hodogram</i> do evento 1 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 23 h de 09 de março de 2018 às 00 h de 11 de março de 2018.	118
Figura 46 –Quadro <i>MVA Results</i> do evento 1 da Tabela 20 catalogado nesta pes- quisa. O evento ocorreu no período: 23 h de 09 de março de 2018 às 00 h de 11 de março de 2018.	118
Figura 47 –Quadro <i>Data Set</i> do evento 2 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 06 h de 13 de maio de 2018 às 14 h de 13 de maio de 2018.	119
Figura 48 –Quadro <i>Axes Directions</i> do evento 2 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 06 h de 13 de maio de 2018 às 14 h de 13 de maio de 2018.	119
Figura 49 –Quadro <i>MVA Hodogram</i> do evento 2 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 06 h de 13 de maio de 2018 às 14 h de 13 de maio de 2018.	120
Figura 50 –Quadro <i>MVA Results</i> do evento 2 da Tabela 20 catalogado nesta pes- quisa. O evento ocorreu no período: 06 h de 13 de maio de 2018 às 14 h de 13 de maio de 2018.	120
Figura 51 –Quadro <i>Data Set</i> do evento 3 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 11 h de 06 de junho de 2018 às 10 h de 07 de junho de 2018.	121
Figura 52 –Quadro <i>Axes Directions</i> do evento 3 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 11 h de 06 de junho de 2018 às 10 h de 07 de junho de 2018.	121

Figura 53	–Quadro <i>MVA Hodogram</i> do evento 3 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 11 h de 06 de junho de 2018 às 10 h de 07 de junho de 2018.	122
Figura 54	–Quadro <i>MVA Results</i> do evento 3 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 11 h de 06 de junho de 2018 às 10 h de 07 de junho de 2018.	122
Figura 55	–Quadro <i>Data Set</i> do evento 4 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 10 h de 25 de junho de 2018 às 05 h de 26 de junho de 2018.	123
Figura 56	–Quadro <i>Axes Directions</i> do evento 4 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 10 h de 25 de junho de 2018 às 05 h de 26 de junho de 2018.	123
Figura 57	–Quadro <i>MVA Hodogram</i> do evento 4 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 10 h de 25 de junho de 2018 às 05 h de 26 de junho de 2018.	124
Figura 58	–Quadro <i>MVA Results</i> do evento 4 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 10 h de 25 de junho de 2018 às 05 h de 26 de junho de 2018.	124
Figura 59	–Quadro <i>Data Set</i> do evento 5 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 20 h de 30 de junho de 2018 às 10 h de 02 de julho de 2018.	125
Figura 60	–Quadro <i>Axes Directions</i> do evento 5 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 20 h de 30 de junho de 2018 às 10 h de 02 de junho de 2018.	125
Figura 61	–Quadro <i>MVA Hodogram</i> do evento 5 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 20 h de 30 de junho de 2018 às 10 h de 02 de junho de 2018.	126
Figura 62	–Quadro <i>MVA Results</i> do evento 5 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 20 h de 30 de junho de 2018 às 10 h de 02 de junho de 2018.	126
Figura 63	–Quadro <i>Data Set</i> do evento 6 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 12 h de 10 de julho de 2018 às 03 h de 11 de julho de 2018.	127
Figura 64	–Quadro <i>Axes Directions</i> do evento 6 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 12 h de 10 de julho de 2018 às 03 h de 11 de julho de 2018.	127
Figura 65	–Quadro <i>MVA Hodogram</i> do evento 6 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 12 h de 10 de julho de 2018 às 03 h de 11 de junho de 2018.	128

Figura 66 –Quadro <i>MVA Results</i> do evento 6 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 12 h de 10 de julho de 2018 às 03 h de 11 de julho de 2018.	128
Figura 67 –Quadro <i>Data Set</i> do evento 7 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 12 h de 25 de agosto de 2018 às 12 h de 26 de agosto de 2018.	129
Figura 68 –Quadro <i>Axes Directions</i> do evento 7 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 12 h de 25 de agosto de 2018 às 12 h de 26 de agosto de 2018.	129
Figura 69 –Quadro <i>MVA Hodogram</i> do evento 7 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 12 h de 25 de agosto de 2018 às 12 h de 26 de agosto de 2018.	130
Figura 70 –Quadro <i>MVA Results</i> do evento 7 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 12 h de 25 de agosto de 2018 às 12 h de 26 de agosto de 2018.	130

Lista de tabelas

Tabela 1 – Validação do algoritmo de MVA através da análise das nuvens magnéticas catalogadas por Huttunen <i>et al.</i> (2005) para o ano 2000, com duração superior a 12 h. As duas primeiras colunas apresentam o início e o fim dos eventos, seguidas dos autovalores λ_2 e λ_3 normalizados. As duas últimas colunas contém as razões calculadas neste trabalho e as razões segundo Huttunen <i>et al.</i> (2005).	54
Tabela 2 – Exemplos de elipsoides degenerados. Cada coluna contém uma vista do elipsoide, enquanto cada linha contém diferentes casos de autovalores.	63
Tabela 3 – Exemplos de elipsoides não-degenerados. Cada coluna contém uma vista do elipsoide, enquanto cada linha contém diferentes casos de autovalores.	63
Tabela 4 – Condições para o sinal dos componentes x_1 e x_2 do vetor $\vec{x}_2 = (x_1, x_2, x_3)$ e equação de cálculo do ângulo ϕ	67
Tabela 5 – Condições para o sinal dos componentes x_1 , x_2 e x_3 do vetor $\vec{x}_2 = (x_1, x_2, x_3)$ e equação de cálculo do ângulo θ	67
Tabela 6 – Análise das componentes B_x e B_y e cálculo da componente B_{lon}	68
Tabela 7 – Identificação dos tubos bipolares $ \theta \leq 45^\circ$	69
Tabela 8 – Identificação dos tubos unipolares $ \theta > 45^\circ$	69
Tabela 9 – Relação entre os ângulos ϕ , θ e ω . Em cada coluna ocorrem os possíveis valores para cada ângulo e, linha a linha, apresenta-se a correspondência que define o valor de ω	70
Tabela 10 – Correção dos ângulos ϕ e θ de nuvens unipolares e cenários para comparação.	71
Tabela 11 – Correção dos ângulos ϕ e θ de nuvens bipolares e cenários para comparação.	71
Tabela 12 – Tabela de resultados do MVA para o evento do período das 00 em 29 de abril de 2001 às 13 do mesmo dia.	82
Tabela 13 – Motivação para correção dos ângulos do eixo da nuvem magnética obtidos pelo MVA catalogados segundo Huttunen <i>et al.</i> (2005). As colunas apresentam, nesta ordem, o tipo de tubo, início e o fim dos eventos, ângulos (ϕ, θ) e o problema relacionado com o tipo de nuvem.	85
Tabela 14 – Quadro <i>MVA Results</i> da nuvem catalogada no período: 15 h: de 21 de fevereiro de 2000 às 11 h de 22 de fevereiro de 2000.	88

Tabela 15	– Sumário da análise do evento ocorrido no período de 19-22 de Março de 2001. Quatro estudos indicaram a presença de duas nuvens magnéticas, enquanto seis identificaram apenas uma nuvem no período.	88
Tabela 16	– Quadro Resultados de MVA (<i>MVA Results</i>) da MC catalogada no período: 22 h de 19 de março de 2001 às 23 h de 21 de março de 2001.	91
Tabela 17	– Quadro Resultados do MVA (<i>MVA Results</i>) da MC catalogada no período: 20 h de 20 de fevereiro de 2002 às 10h de 01 de março de 2002.	94
Tabela 18	– Quadro Resultados do MVA (<i>MVA Results</i>) da MC catalogada no período: 8 h de 20 de agosto de 1998 às 18 h de 21 de agosto de 1998.	97
Tabela 19	– Correção das inconsistências mostrada na Tabela13 obtidas automaticamente pelo programa. As colunas apresentam nesta ordem: 1) Identificação 2) e 3) início e fim do evento; 4) ângulos (ϕ, θ) obtidos pelo MVA em graus; 5) ângulos obtidos pela função <i>Angellist</i> ; 6) sinal dos autovetores; 7) conjunto de ângulos, e 8) correção da inconsistência relacionada ao tipo de tubo de fluxo.	98
Tabela 20	– Resultado da análise dos eventos do início do mínimo solar do ciclo 24 identificados como ICME no catálogo RC. Ou seja, análise de 07 eventos que ocorreram no ano de 2018. Na primeira coluna consta a identificação do evento, na segunda e na terceira constam o início e fim do evento e as demais colunas apresentam os resultados da análise. Ou seja, na quarta e quinta colunas ocorrem o tipo e a orientação identificados; na sexta, sétima e oitava constam os indicadores numéricos de consistência e a última coluna apresenta a rotação do eixo para <i>matching</i> quando esse foi possível e a expressão <i>NOT</i> , caso contrário.	100
Tabela 21	– Nuvens magnéticas catalogadas de acordo com Lepping, Burlaga e Jones (1990) a partir dos dados do meio interplanetário. A coluna 1 identifica o evento. As colunas 2 e 3 mostram o início e fim da nuvem com os dados: ano(Y), mês(M), dia(D), DOY e hora(H). A coluna 4 apresenta a qualidade da nuvem magnética.	111
Tabela 22	– Resultado da análise dos eventos identificados em Huttunen <i>et al.</i> (2005), catalogados pelo satélite ACE e que não apresentaram gaps maiores que 5 horas em suas componentes. Na primeira coluna consta a identificação do evento, na segunda e na terceira constam o início e fim do evento e as demais colunas apresentam os resultados da análise. Ou seja, na quarta e quinta colunas ocorrem o tipo e a orientação identificados; na sexta, sétima e oitava constam os indicadores numéricos de consistência e a última coluna apresenta a rotação do eixo para <i>matching</i> quando esse foi possível e a expressão <i>NOT</i> , caso contrário.	115

Lista de abreviaturas e siglas

ACE	- Advanced Composition Explorer
ASC	- ACE Science Center
AU	- Unidade Astronômica
ENW	- Tubo de fluxo unipolar ao norte com sentido leste (E) - oeste (W)
ESW	- Tubo de fluxo unipolar ao sul com sentido leste (E) - oeste (W)
GSE	- Sistema de Coordenadas Eclíptico Solar Geocêntrico
ICME	- Ejeções de Massa Coronal Interplanetária
IMF	- Campo Magnético Interplanetário
LASCO	- Large Angle and Spectrometric Coronagraph
L1	- Ponto 1 de Lagrange
LH	- Mão esquerda
MAG	- Magnetic Field Experiment
MC	- Nuvem Magnética
MCs	- Nuvens Magnéticas
MFI	- Wind Magnetic Field Investigation
MHD	- Magnetohidrodinâmica
MVA	- Método da Mínima Variância
NES	- Tubo de fluxo bipolar sentido Norte Sul no octante leste (E).
NWS	- Tubo de fluxo bipolar sentido Norte Sul no octante oeste (W).
PCA	- Método dos componentes principais
RC	- Catálogo RichardsonCane
RH	- Mão direita
SECCHI COR 2	- Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation coronagraph

SEN - Tubo de fluxo bipolar sentido Sul Norte no octante leste (E).

SOHO - Solar and Heliospheric Observatory

STEREO-A - Solar Trrrestrial Relations Observatory Ahead

STEREO-B - Solar Trrrestrial Relations Observatory Behind

SWEPAM - Solar Wind Electron, Proton and Alpha Monitor

SWN - Tubo de fluxo bipolar sentido Sul Norte no octante oeste (W).

UT - Universal Time

WIND - Comprehensive Solar Wind Laboratory for Long-Term Solar Wind Measurements

WNE - Tubo de fluxo unipolar ao norte com sentido oeste (W) - Leste (E)

WSE - Tubo de fluxo unipolar ao sul com sentido oeste (W) - Leste (E)

Lista de símbolos

μ - Valor Médio

σ - desvio Padrão

σ^2 - variância

β - beta do Plasma

μ_0 - coeficiente de permeabilidade no vácuo

p - pressão do plasma ou pressão térmica

B - campo magnético no vento solar

J - densidade de corrente

$\alpha(r)$ - função posição no modelo livre de força

α - constante no modelo livre de força

J_0 - função de Bessel de Primeira Espécie de Ordem Zero

J_1 - função de Bessel de Primeira Espécie de Ordem Um

B_0 - campo Magnético Máximo do Eixo de uma Nuvem Magnética

B_A - campo Magnético Axial no Modelo Livre de Força

B_T - campo Magnético Tangencial no Modelo Livre de Força

B_R - campo Magnético Radial no Modelo Livre de Força

R - distância até o eixo ou raio do cilindro no Modelo Livre de Força

ρ - densidade de massa

v - velocidade do vento solar

v_A - velocidade de Alfvén

g - aceleração da gravidade

t - tempo

L - escala de comprimento

\vec{E} - vetor campo elétrico

σ_0 - condutividade elétrica

F_m - força do campo magnético

V - volume que contém \vec{B}

dV - diferencial de volume

H - helicidade magnética

A - vetor potencial magnético

N - 1 Newton

m - 1 metro

h - 1 hora

nT - 1 nanotesla

kg - 1 quilograma

ρ_0 - ordem de magnitude da densidade de massa

v_0 - ordem de magnitude da velocidade

L_0 - ordem de magnitude do comprimento de escala

B_0 - ordem de magnitude da indução magnética

p_0 - ordem de magnitude da pressão do plasma

(r, v, z) - coordenadas cilíndricas

(J_r, J_v, J_z) - componentes da densidade de corrente em coordenadas cilíndricas

(B_r, B_v, B_z) - componentes do IMF em coordenadas cilíndricas

(x, y, z) - sistema cartesiano de coordenadas

B_x - componente - x do IMF

B_y - componente - y do IMF

B_z - componente - z do IMF

B_x^* - componente de máxima variância

B_y^* - componente de média variância

B_z^* - componente de mínima variância

\vec{x}_i - autovetor correspondente ao i -ésimo autovalor

λ_i - autovalor correspondente ao i -ésimo autovetor

\therefore - portanto

ϕ - ângulo longitudinal do sistema GSE

θ - ângulo latitudinal do sistema GSE

(S) - sul

(N) - norte

(E) - leste

(W) - Oeste

\mathbb{R}^m - espaço real de dimensão m

\mathbb{R}^k - espaço real de dimensão k

\mathbb{R}^n - espaço real de dimensão n

\mathbb{R}^3 - espaço real de dimensão 3

\vec{n} - vetor normal ao plano de máxima variância

(n_x, n_y, n_z) - componentes do vetor normal ao plano de máxima variância

$\{\vec{B}^i\}_{i=1}^N$ - conjunto de observações do campo

N - número de observações do campo magnético

$\langle \cdot \rangle$ - operador média

A - subconjunto aberto do espaço

Λ - operador de Lagrange

\otimes - representação que um vetor está entrando no plano

$M_{\mu\nu}^B$ - matriz de covariância

(M/D) - mês e dia

(D/M/A H) - dia, mês, ano e hora

Q_1 - qualidade excelente de uma nuvem magnética

Q_2 - qualidade boa de uma nuvem magnética

Q_3 - qualidade ruim de uma nuvem magnética

B_{lat} - componente latitudinal do campo magnético

B_{lon} - componente longitudinal do campo magnético

L - esquerda

R - direita

ω - ângulo proveniente da projeção dos ângulos (ϕ, θ) no plano yOz

yOz - plano

$\vec{v} = (a, b, c)$ -vetor unitário

$B_x^* \times B_y^*$ - plano de máxima variância

$B_y^* \times B_z^*$ - plano de mínima variância

$B_T^* \times B_A^*$ - plano de máxima variância

$B_A^* \times B_R^*$ - plano de mínima variância

χ - ângulo de rotação do campo magnético

MCO - ausência de nuvem magnética

$MC1$ - possível presença de nuvem magnética

$MC2$ - presença de nuvem magnética

Sumário

1	Introdução	33
2	Fundamentação Teórica	37
2.1	Nuvens Magnéticas	37
2.2	Modelo <i>Force-Free</i>	39
2.3	Método da Mínima Variância	47
2.4	Validação da implementação do MVA	53
3	Dados e Metodologia	55
3.1	Dados	55
3.1.1	Dados do satélite ACE	55
3.1.2	Dados do satélite WIND	58
3.2	Degeneração do MVA	61
3.2.1	Experimento computacional	63
3.3	Caracterização do tubo de fluxo	65
3.3.1	Processamento de dados	66
3.3.2	Processamento do modelo	69
3.3.3	Visualização	71
4	Resultados e discussões	73
4.1	Análise da Degeneração do MVA	73
4.1.1	Catálogo RC	73
4.1.2	Catálogo WIND	77
4.2	Interface gráfica para usuário e sua utilização	79
4.2.1	Módulo de visualização 3D	83
4.3	Análise dos ângulos do eixo da nuvem obtidos no MVA	83
4.3.1	Estudo de caso: Tubo WNE	84
4.3.2	Estudo de caso: Tubo WSE	87
4.3.3	Estudo de caso: Tubo SWN	90
4.3.4	Estudo de caso: Tubo SWN	94
4.3.5	Estatística do Experimento	96
4.3.6	Caracterização de eventos do mínimo solar do ciclo 24	99
5	Conclusões	103
	Referências	105

APÊNDICE A Tabela WIND	111
APÊNDICE B Detalhamento da análise de resultados	115
APÊNDICE C Detalhamento dos eventos do mínimo solar do ciclo 24	117
APÊNDICE D Atividades e produção científica	131
D.1 Publicações	131
D.2 Trabalhos em redação	132
D.3 Outras atividades realizadas durante o Doutorado	132

1 Introdução

O Sol passa por ciclos de atividade magnética caracterizados pela variação do número de manchas solares observadas na fotosfera. Os grupos de manchas formam regiões magneticamente interconectadas, que confinam partículas energéticas. Ocasionalmente, essas regiões podem ter o campo magnético desconfigurado, permitindo a emissão de grande quantidade de matéria para o meio interplanetário. Essa emissão de plasma quente e denso é chamada Ejeção de Massa Coronal (CME).

As CMEs foram introduzidas formalmente no estudo de física espacial, com o trabalho de [Gosling *et al.* \(1975\)](#), com evidências oriundas de observações, realizadas por instrumentos ópticos em luz branca, chamados coronógrafos. Estes instrumentos não recebem a luz direta incidente do disco solar. Isto pois, são projetados para bloquear a luz direta da estrela, a fim de detectar os objetos próximos escondidos em seu brilho intenso. A observação de um coronógrafo é equivalente a observar o Sol durante um eclipse total.

As CMEs direcionadas paralelamente ou anti paralelamente à linha Sol Terra, são frequentemente chamadas de CME tipo Halo. Recebem esse nome devido a forma como aparecem nas imagens dos coronógrafos. À medida que uma CME em expansão dirigida para a Terra se torna cada vez maior, parece envolver o Sol, formando um halo em torno da estrela. Assim, a imagem obtida pelo coronógrafo possui variação angular de aproximadamente 360° ([HOWARD *et al.*, 1982](#)).

Do ponto de vista físico, as CMEs são enormes erupções de plasma magnetizado expelido do Sol para o espaço interplanetário, ao longo de horas ou dias ([MIERLA *et al.*, 2010](#)). À medida que a CME se desloca da baixa coroa para o meio interplanetário, esta se esfria por causa da expansão, e passa a ser chamada Ejeção de Massa Coronal Interplanetária (ICME), uma vez que é observada no meio interplanetário. As magnitudes físicas que caracterizam as ICMEs podem ser medidas *in situ* por espaçonaves ([SCHWENN, 2006](#)). A resolução temporal, amostragem, sensibilidade e especificidade dos instrumentos, permitem identificar um subconjunto de ICMEs, com características peculiares, chamado nuvens magnéticas (do inglês *magnetic clouds* ou apenas MCs) ([BURLAGA *et al.*, 1981](#); [BURLAGA, 1991](#); [LEPPING; BURLAGA; JONES, 1990](#); [SCHWENN; MARSCH; JACKSON, 1993](#); [SCHWENN, 2006](#); [GONZÁLEZ *et al.*, 2017a](#)). As MCs são eventos muito geofetivos causadores de tempestades geomagnéticas que perturbam os sistemas de corrente ionosféricos e magnetosféricos ([GONZALEZ; TSURUTANI, 1987](#); [LAGO *et al.*, 2001](#); [ECHER; ALVES; GONZALEZ, 2005](#)).

Uma aproximação adequada para a topologia das linhas de campo magnético de uma nuvem magnética é dada pelo modelo de equilíbrio livre de força (do inglês *force-*

free) (BURLAGA, 1988; LEPPING; BURLAGA; JONES, 1990; GONZÁLEZ *et al.*, 2013). Isso corresponde ao modelo proposto por Goldstein (1983), que propõe que as MCs formam um tubo de fluxo magnético no qual as correntes elétricas são paralelas ou anti-paralelas às linhas do campo magnético. Em outras palavras, o tubo de fluxo magnético é considerado um corpo cilíndrico com plasma magnetizado e linhas de campo torcidas (PRIEST; FORBES, 1990).

Desse modo, segundo Sonnerup e Scheible (1998) modela-se uma nuvem magnética ideal como um cilindro do modelo livre de força. Para encontrar a orientação do eixo do cilindro, o método da mínima variância (MVA) é aplicado (SONNERUP; CAHILL L. J., 1967) em observações do campo magnético interplanetário (BURLAGA *et al.*, 1981; BOTHMER; RUST, 1997). O método MVA e o modelo livre de força são duas metodologias amplamente utilizadas no estudo de nuvens magnéticas. MVA é um problema clássico de autovalores e autovetores que projeta dados medidos *in situ* em um novo sistema de coordenadas bidimensional, representando a melhor seção transversal possível do cilindro proposto pelo modelo livre de força. A aplicabilidade do MVA é tradicionalmente definida de acordo com relações entre os autovalores (LEPPING; BEHANNON, 1980; SISCOE; SUEY, 1972).

No entanto, há nuvens magnéticas identificadas na literatura que não atendem aos critérios de Lepping e Behannon (1980), Siscoe e Suey (1972), ou seja, o MVA é degenerado para esses eventos. Enquanto há eventos de ICME catalogados sem a ocorrência de nuvens que atendem a esses critérios. Tanto essas situações, como publicações recentes (DÉMOULIN; DASSO; JANVIER, 2018), demonstram que a degeneração do MVA ainda é um problema em aberto na ciência.

Além disso, a geometria do modelo livre de força combinado à solução do MVA apresenta incoerências em diversos casos catalogados na literatura (HUTTUNEN *et al.*, 2005; DÉMOULIN; DASSO; JANVIER, 2018). Nesta pesquisa, identifica-se divergências com a direção e sentido dos vetores-eixo apresentados por Huttunen *et al.* (2005), por exemplo. Novamente, o trabalho recente de Démoulin, Dasso e Janvier (2018) demonstra essa dificuldade de decisão em relação à saída do modelo MVA ao descrever que seus autovetores podem precisar de uma mudança de sinal, ou seja, uma inversão de sentido.

Sendo assim, o objetivo geral deste trabalho é construir um método computacional para caracterização automática de nuvens magnéticas. Para tanto, é necessário estudar a geometria das nuvens magnéticas, tanto em relação ao modelo livre de força quanto em relação às propriedades do MVA.

Consequentemente, este projeto resulta em uma métrica matemática que avalia a separação de autovalores e um sistema de caracterização e classificação da geometria de nuvens magnéticas.

Assim, a importância desta pesquisa se justifica pela contribuição à comunidade científica na validação do método da Mínima Variância e na caracterização de nuvens magnéticas, contribuindo para estudos na área do Clima Espacial.

Os objetivos específicos, são:

1. Caracterizar a geometria das nuvens magnéticas (MVA, modelo livre de força).
2. Propor métrica matemática que avalie a separação de autovalores.
3. Rotacionar o modelo livre de força para ajuste com casos reais.
4. Identificar automaticamente o tipo de tubo de fluxo.
5. Propor correção dos ângulos latitudinal e longitudinal.
6. Construir um programa executável amigável para o usuário/pesquisador.
7. Automatizar a tomada de decisão ao final do experimento.

Esta monografia está organizada em cinco capítulos e quatro apêndices. Além desta introdução, o Capítulo 2 contém a revisão bibliográfica. O Capítulo 3 apresenta a maneira como os dados foram coletados e a metodologia proposta. No Capítulo 4 são organizados os resultados e discussões desta pesquisa. O Capítulo 5 descreve as conclusões deste trabalho e apresenta encaminhamentos futuros desta pesquisa. O Apêndice A consiste de uma tabela sobre nuvens magnéticas catalogadas de acordo com [Lepping, Burlaga e Jones \(1990\)](#) a partir dos dados do meio interplanetário. O Apêndice B consiste de uma tabela que contém a análise dos eventos identificados em [Huttunen et al. \(2005\)](#), catalogados pelo satélite ACE e que não apresentaram lacunas *gaps* maiores que 5 horas em suas componentes. O Apêndice C apresenta os resultados obtidos para novos eventos que ocorreram no período do mínimo solar do ciclo 24. O Apêndice D descreve as atividades e produções científicas realizadas durante o período deste doutorado.

2 Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica que suporta todo o trabalho desenvolvido. Na Seção 2.1 apresentamos a teoria acerca das nuvens magnéticas. Na Seção 2.2 mostramos o modelo livre de força e seu desenvolvimento com as MCs. Na Seção 2.3 desenvolvemos matematicamente o método de mínima variância e sua relação com o modelo livre de força e com as MCs. Por fim, na Seção 2.4 apresentamos a base computacional usada no trabalho.

2.1 Nuvens Magnéticas

Nuvens magnéticas são distúrbios no vento solar, observados em ejeções de massa coronal interplanetária, que apresentam propriedades singulares em sua identificação, provenientes de mudanças repentinas do campo magnético solar em regiões ativas (BURLAGA *et al.*, 1981; KLEIN; BURLAGA, 1982; FARRUGIA; OSHEROVICH; BURLAGA, 1995; BURLAGA, 1991; LEPPING; BURLAGA; JONES, 1990; SCHWENN; MARSCH; JACKSON, 1993; SCHWENN, 2006; GONZÁLEZ *et al.*, 2017a). Segundo definido por Burlaga *et al.* (1981), para que um evento seja classificado como nuvem magnética, ele deve apresentar simultaneamente:

- baixa velocidade térmica de íons;
- maior intensidade de campo magnético que o ambiente;
- rotação suave do vetor campo magnético medido pelo satélite quando a nuvem passa através dele;
- valores do beta de plasma¹ menores que o ambiente.

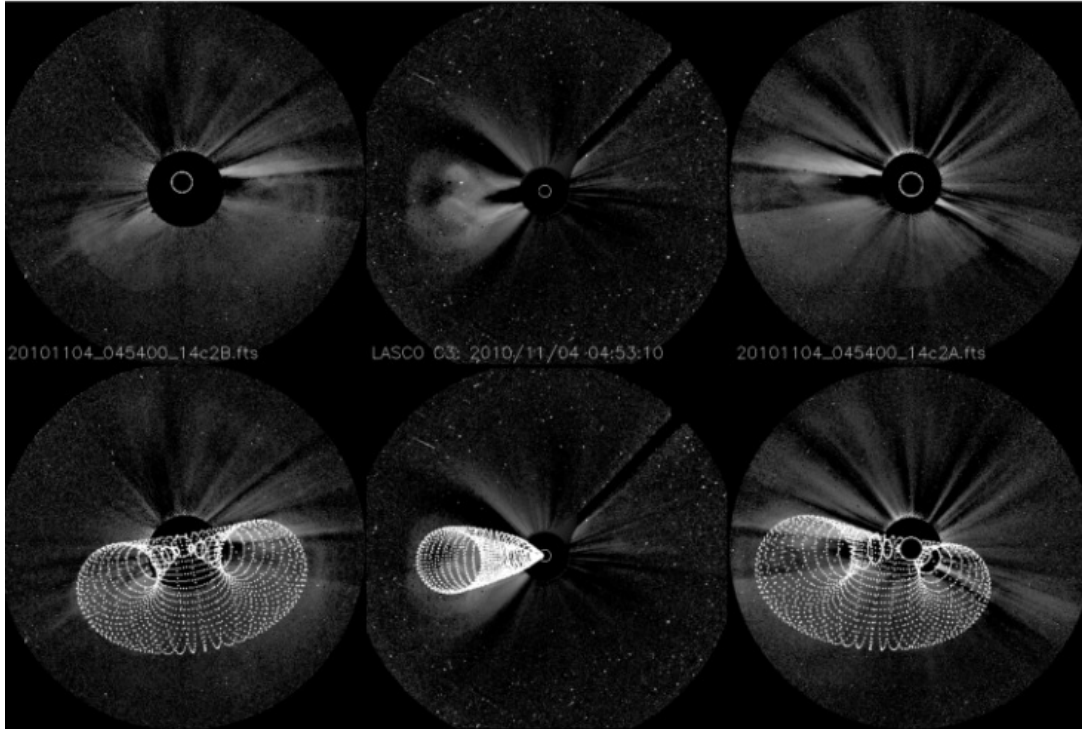
O termo “simultaneamente” faz-se necessário, uma vez que as propriedades podem ser verificadas isoladamente *in situ* em subconjuntos de ICMEs e outros distúrbios no vento solar, nestes casos os eventos não devem ser catalogados como MCs. Portanto, apenas as nuvens magnéticas apresentam esse conjunto de características “simultaneamente” (BURLAGA, 1988).

A Figura 1 apresenta dois painéis de imagens, sendo que as superiores correspondem à imagens cronográficas de uma CME posteriormente identificada *in situ* como nuvem magnética, a CME ocorreu em 04 de novembro de 2010. Ela é apresentada em escala de cinza, da esquerda para a direita, em imagens obtidas pelos telescópios STEREO-B /

¹ $\beta = (\text{pressão cinética}) / (\text{pressão magnética})$

SECCHI COR2, SOHO / LASCO C3 e STEREO-A / SECCHI COR2 e as inferiores, correspondem às respectivas imagens reconstruídas a partir de modelos.

Figura 1 – As imagens em escala de cinza da esquerda para a direita são as imagens cronográficas obtidas pelos telescópios STEREO-B / SECCHI COR2, SOHO / LASCO C3 e STEREO-A / SECCHI COR2 em 04 de novembro de 2010.



FONTE: Figura 3 de [Isavnin, Vourlidis e Kilpua \(2013\)](#).

De acordo com [Nieves-Chincilla, Hidalgo e Sequeiros \(2005\)](#), existem três maneiras diferentes de analisar e estudar MCs, são eles: estudos puramente teóricos, que consideram uma geometria ideal para a estrutura do campo magnético, por exemplo [Farrugia, Osherovich e Burlaga \(1995\)](#); estudos com métodos numéricos para reproduzir a topologia do campo magnético, por exemplo [Hu e Sonnerup \(2001\)](#), [Hu e Sonnerup \(2002\)](#), [Hu e Sonnerup \(2003\)](#), [Vandas, Odstrčil e Watari \(2002\)](#), [Lui \(2011\)](#), [Lugaz e Farrugia \(2014\)](#); e estudos de modelos matemáticos analíticos que assumem topologia simples para a nuvem. Os modelos analíticos são desenvolvidos para reconstruir as MCs a partir de dados de satélites no meio interplanetário, permitindo que o modelo seja ajustado a dados experimentais ([BURLAGA, 1988](#); [MARUBASHI, 1986](#); [MARUBASHI; LEPPING, 2007](#); [LEPPING; BURLAGA; JONES, 1990](#); [MULLIGAN; RUSSELL, 2001](#); [CID *et al.*, 2002](#); [GONZÁLEZ *et al.*, 2017b](#)).

Neste contexto, [Farrugia, Osherovich e Burlaga \(1995\)](#) propôs que uma nuvem ideal é ajustável a um tubo de fluxo de larga escala com as linhas de campo torcidas, chamado *force-free uniformly twisted field*. [Vandas, Fischer e Geranios \(1991\)](#) traz um estudo sobre modelos cilíndricos e esféricos para uma nuvem. [Cid *et al.* \(2002\)](#) considera

que a seção transversal da nuvem é distorcida elípticamente devido à sua interação com o vento solar. Em [Marubashi \(1986\)](#), os autores fazem uma comparação entre um modelo cilíndrico e um toroidal para nuvens de longa duração (maiores que 24 h). [Nieves-Chincilla et al. \(2018\)](#) traz um modelo analítico elíptico-cilíndrico para a nuvem, que constitui numa evolução da geometria cilíndrica circular ([NIEVES-CHINCILLA et al., 2016](#)). Associado ao desenvolvimento desses modelos, existe a análise da helicidade do campo magnético, baseada na topologia escolhida ([VANDAS; ROMASHETS, 2017; DASSO et al., 2006; DASSO; DÉMOULIN; GULISANO, 2012; DÉMOULIN; JANVIER; DASSO, 2016](#)).

Neste trabalho, vamos nos basear no modelo de equilíbrio livre de força (do inglês *force-free*) ([BURLAGA, 1988; LEPPING; BURLAGA; JONES, 1990; GONZÁLEZ et al., 2013](#)). Esta escolha se deve à simplicidade e eficiência do método, como mostra [Lepping et al. \(2020\)](#).

2.2 Modelo Force-Free

Para o estudo das nuvens magnéticas, busca-se um ajuste ideal da geometria quanto à morfologia do campo magnético do evento. Neste trabalho, esse ajuste é dado pelo modelo de equilíbrio livre de força (*force-free model*) ([LUNDQUIST, 1950; GOLDSTEIN, 1983; BURLAGA, 1988; LEPPING; BURLAGA; JONES, 1990](#)). Apresentamos a seguir o desenvolvimento do método.

Considere uma região do espaço em que o campo magnético externo \vec{B} está numa direção fixa paralelo ao plano da eclíptica, onde existe um volume de plasma na forma de fluido magneto-condutor influenciado pelo gradiente de pressão hidrostática. As partículas estão em movimento no interior do plasma e formam uma corrente elétrica \vec{J} perpendicular ao campo magnético. Ainda, como o plasma do meio interplanetário é influenciado pela gravidade de outros corpos celestiais, deve-se considerar uma força de gravidade sobre ele. A Figura 2 sumariza o sistema de equilíbrio sobre uma amostra desse fluido.

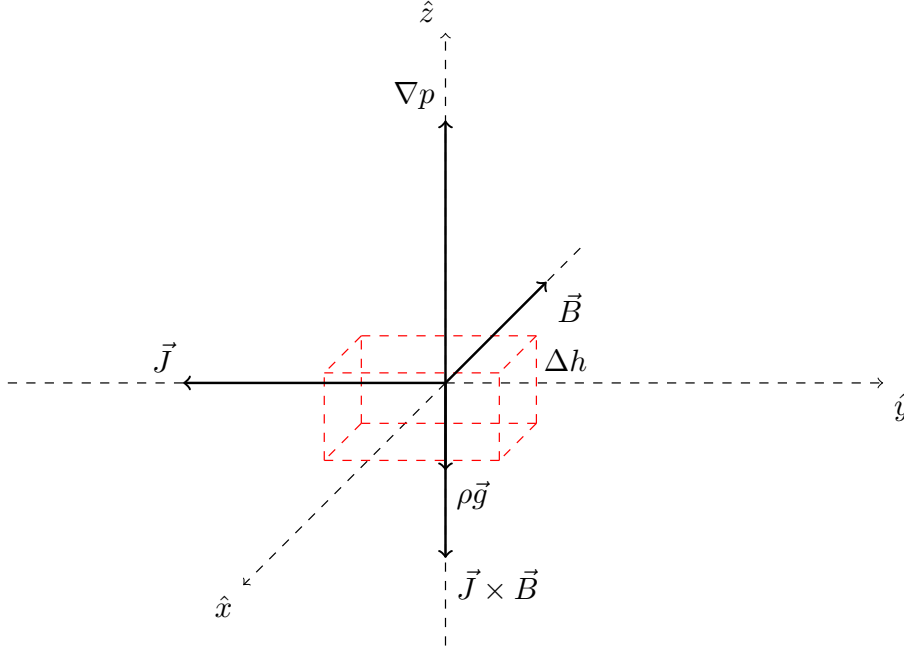
Neste contexto, a força resultante por unidade de volume [N/m^3] é dada pela Equação (2.1):

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla p + \vec{J} \times \vec{B} + \rho \vec{g} \quad (2.1)$$

Na teoria Magnetohidrodinâmica (MHD) é necessário considerar aproximações que permitam simplificar o desenvolvimento da Equação (2.1) e assim obter soluções analíticas. Estas soluções permitem criar modelos semi-empíricos para estudar MCs. Uma maneira bastante comum de fazer essas simplificações é escrevê-las em função do valor máximo que poderiam assumir as magnitudes envolvidas. Assim, os termos da Equação (2.1) em função das magnitudes são

$$\frac{\rho_0 v_0^2}{L_0} = \frac{p_0}{L_0} + \frac{B_0^2}{\mu_0 L_0} + \rho_0 g. \quad (2.2)$$

Figura 2 – Amostra de um fluido em equilíbrio MHD sob a força gravitacional, força magnética e gradiente de pressão.



FONTE: Figura 2.1 de [González \(2013\)](#).

Nesse caso, verifica-se a coerência dimensional na Equação (2.3)

$$\left[\frac{N}{m^3} \right] = \left[\frac{N}{m^3} \right] + \left[\frac{N}{m^3} \right] + \left[\frac{N}{m^3} \right], \quad (2.3)$$

onde os parâmetros, velocidade $v_0(m/s)$, densidade $\rho_0(kg/m^3)$, pressão $p_0(N/m^2)$, indução magnética $B_0(nT)$ e comprimento de escala $L_0(m)$ são típicos do plasma.

Na Equação (2.1) o termo gravitacional que ocorre no interior da nuvem é muito menor que o magnético, ou seja, na Equação (2.2), $\rho_0 g \ll \frac{B_0^2}{\mu_0 L_0}$. Desse modo, $\rho_0 g$ pode ser negligenciado e, daí,

$$\frac{\rho_0 v_0^2}{L_0} = \frac{p_0}{L_0} + \frac{B_0^2}{\mu_0 L_0}. \quad (2.4)$$

Além disso, os dois termos à direita possuem a mesma ordem de grandeza e pode-se escolher o termo magnético para ser comparado ao termo à esquerda. Ou seja,

$$\frac{\rho_0 v_0^2}{L_0} = \frac{B_0^2}{\mu_0 L_0}. \quad (2.5)$$

Seguindo o desenvolvimento, sabe-se que no plasma quase-estacionário, a velocidade das partículas são menores que a velocidade de Alfvén (v_A) e, por isso,

$$v_0^2 \ll \frac{B_0^2}{\mu_0 \rho_0} \equiv v_A^2 \quad (2.6)$$

multiplicando a equação anterior por ρ_0/L_0 , tem-se que

$$\frac{\rho_0 v_0^2}{L_0} \ll \frac{B_0^2}{\mu_0 L_0}. \quad (2.7)$$

Lembrando que foi considerado que os termos $\frac{p_0}{L_0}$ e $\frac{B_0^2}{\mu_0 L_0}$ tinham a mesma ordem de grandeza. Portanto, também pode-se interpretar a partir da Equação (2.7) que

$$\frac{\rho_0 v_0^2}{L_0} \ll \frac{p_0}{L_0}. \quad (2.8)$$

Considerando as simplificações anteriores, reescreve-se a Equação (2.1) da seguinte maneira

$$0 = -\nabla p + \vec{J} \times \vec{B}. \quad (2.9)$$

Com isso, obtém-se a Equação (2.10) que descreve o equilíbrio magnetostático no eixo Z da Figura 2 (IVANOV *et al.*, 1989)

$$\nabla p = \vec{J} \times \vec{B}. \quad (2.10)$$

Ou seja, de acordo com a Equação (2.10), para que o equilíbrio ocorra, deve ser considerado que a força magnética é igual ao gradiente de pressão do plasma.

Nesse ponto, insere-se o parâmetro β , chamado beta de plasma. Este parâmetro consiste na razão entre a pressão do gás e a magnética ($\beta = \frac{p}{(B_0^2/2\mu_0)}$). No interior da nuvem, temos $\beta \ll 1$, razão pela qual pode-se considerar que

$$\frac{p_0}{L_0} \ll \frac{B_0^2}{\mu_0 L_0}. \quad (2.11)$$

Isto implica na chamada condição livre de força ou *force-free* (o termo livre de força refere-se à força magnética nula)

$$\vec{J} \times \vec{B} = 0 \quad (2.12)$$

muito utilizado para estudar a geometria de MCs. O desenvolvimento anterior mostra a importância de verificar a ordem de grandeza do β antes de usar o modelo livre de força no estudo de MCs.

Na sequência, insere-se a simplificação adotada na Equação (2.12) nas equações de Maxwell. Multiplicando vetorialmente a lei de Ampère pelo vetor indução magnética, tem-se

$$(\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} = \mu_0 (\vec{J} \times \vec{B}) = 0. \quad (2.13)$$

Interpreta-se que a corrente é paralela ao campo magnético e, do ponto de vista matemático, $\mu_0 \vec{J} = \alpha(r) \vec{B}$. Isso permite re-escrever a lei de Ampère como

$$\nabla \times \vec{B} = \alpha(r) \vec{B}. \quad (2.14)$$

Veja que a Equação (2.14) somente terá coerência dimensional se α têm unidades de $[\text{m}^{-1}]$. Aplicando o operador rotacional na Equação (2.14), obtém-se

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{B}) = \alpha(r)(\nabla \times \vec{B}) = \alpha(r)^2 \vec{B}. \quad (2.15)$$

Com isso, aplica-se a identidade matemática $\nabla \times (\nabla \times \vec{B}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{B}) - (\nabla \cdot \nabla)\vec{B}$ na qual, segundo Maxwell, $\nabla \cdot \vec{B} = 0$. Logo, a Equação (2.15) se reduz em

$$\nabla^2 \vec{B} = -[\alpha(r)]^2 \vec{B}. \quad (2.16)$$

Pode-se dizer que existe um número infinito de configurações para diferentes escolhas de $\alpha(r)$.

Com o decaimento do campo magnético devido à condutividade infinita do fluido, aplica-se o operador ∇ na Lei de Ohm e obtém-se

$$\nabla \times \vec{J} = \sigma_0(\nabla \times \vec{E} + \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B})), \quad (2.17)$$

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{\nabla \times \vec{J}}{\sigma_0} - \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}). \quad (2.18)$$

Como o campo magnético é livre de força, então $F_m = q(\vec{v} \times \vec{B}) = 0$ e as partículas viajam ao longo das linhas do campo. Trabalhando conjuntamente, as leis de Ampère e Faraday, obtém-se

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{1}{\sigma_0}(\nabla \times \vec{J}) = -\frac{1}{\mu_0 \sigma_0}(\nabla \times (\nabla \times \vec{B})). \quad (2.19)$$

Consequentemente, da Equação (2.14), tem-se

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0 \sigma_0}(\nabla \times (\alpha(r)\vec{B})). \quad (2.20)$$

Usando a igualdade $\nabla \times (\alpha(r)\vec{B}) = \alpha(r)(\nabla \times \vec{B}) + (\nabla\alpha(r)) \times \vec{B}$, tem-se a expressão final

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0 \sigma_0} [(\alpha(r))^2 \vec{B} + (\nabla\alpha(r)) \times \vec{B}]. \quad (2.21)$$

O termo $(\nabla\alpha(r)) \times \vec{B}$ da Equação (2.21) pode torcer a forma do fluido, pois a componente $\nabla\alpha(r) \times \vec{B}$ irá produzir uma força nas linhas do campo \vec{B} , causando uma torção. A magnitude topológica para medir a torção das linhas de campo magnético é a helicidade magnética H (MARSH, 1996; DASSO *et al.*, 2005), conforme

$$H = \int_V \vec{A} \cdot \vec{B} dV, \text{ com } \vec{B} = \nabla \times \vec{A}, \quad (2.22)$$

na qual, \vec{A} é o vetor potencial magnético.

Considerando um campo livre de força e $\alpha(r)$ constante, a Equação (2.21) se reduz

a

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\alpha^2}{\mu_0 \sigma_0} \vec{B}, \quad (2.23)$$

cuja solução é dada por

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \exp\left(-\frac{\alpha^2}{\mu_0\sigma_0}t\right). \quad (2.24)$$

Nesse contexto, [Goldstein \(1983\)](#) propôs que uma nuvem magnética pode ser modelada idealmente por um cilindro simétrico a partir do modelo livre de força. Assim, escrevendo os vetores campo magnético e a corrente em coordenadas cilíndricas, $\vec{J} = (J_r, J_v, J_z)$ e $\vec{B} = (B_r, B_v, B_z)$, tem-se

$$\vec{J} \times \vec{B} = (J_v B_z - J_z B_v)\hat{r} + (J_z B_r - J_r B_z)\hat{v} + (J_r B_v - J_v B_r)\hat{z} \quad (2.25)$$

e

$$\nabla p = \frac{\partial p}{\partial r}\hat{r} + \frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial v}\hat{v} + \frac{\partial p}{\partial z}\hat{z}. \quad (2.26)$$

Além disso, considerando um tubo de fluxo cilíndricamente simétrico com as componentes do campo magnético $B_r(r) = 0$ e pressão do gás² $p = p(r)$, então $\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial v} = 0$ e substituindo na Equação (2.10), tem-se

$$\frac{dp(r)}{dr} = J_v(r)B_z(r) - J_z(r)B_v(r). \quad (2.27)$$

A partir da Lei de Ampère, tem-se que a densidade de corrente \vec{J} em coordenadas cilíndricas é dada por

$$\vec{J} = \left(0, -\frac{1}{\mu_0}\frac{\partial B_v}{\partial r}, \frac{1}{\mu_0 r}\frac{\partial(rB_v)}{\partial r}\right). \quad (2.28)$$

Desse modo, a Equação (2.14) (condição livre de força) é transformada no sistema diferencial

$$\begin{cases} \alpha(r)B_v(r) = -\frac{\partial B_v}{\partial r} \\ \alpha(r)B_z(r) = \frac{1}{r}\frac{\partial(rB_v)}{\partial r} \end{cases}. \quad (2.29)$$

Considerando α constante, o sistema de equações diferenciais pode ser escrito como:

$$B_v(r) = -\frac{1}{\alpha}\frac{dB_z(r)}{dr} \quad (2.30)$$

e

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dB_v(r)}{dr}\right) + \alpha^2 B_z(r) = 0. \quad (2.31)$$

A resolução das Equações (2.30) e (2.31) é dada por [Lundquist \(1950\)](#) e consistem em

$$B_v(r) = J_1(\alpha r) \text{ e } B_z(r) = J_0(\alpha r) \quad (2.32)$$

onde J_0 e J_1 são funções de Bessel de primeiro tipo, dadas por:

$$J_0(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m!m!} \left(\frac{x}{2}\right)^{2m}, \quad (2.33)$$

² Ainda que não se utilize no modelo livre de força

$$J_1(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m!(m+1)!} \left(\frac{x}{2}\right)^{2m+1}. \quad (2.34)$$

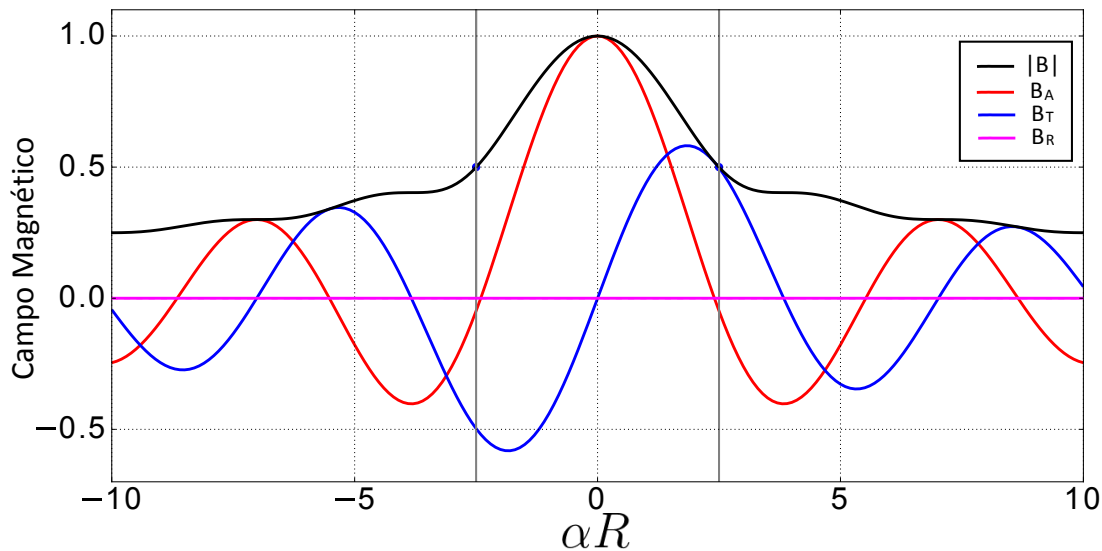
Segundo Burlaga (1988), assumindo uma topologia cilíndrica para o campo magnético local, as soluções para o modelo livre de força determinam as componentes

$$B_A = B_0 J_0(\alpha R), \quad B_T = B_0 H J_1(\alpha R) \quad \text{e} \quad B_R = 0 \quad (2.35)$$

sendo B_A a componente do campo magnético ao longo do eixo da nuvem magnética, chamada componente axial; B_T o componente do campo magnético na direção azimutal; B_R a componente radial do campo magnético; R a distância até o eixo ou raio do cilindro; $H = \pm 1$ proveniente do sentido da rotação do campo magnético; B_0 é uma constante que estima a intensidade do campo no eixo da nuvem e α é a constante do modelo *force-free* linear ($\alpha = 2, 4/R$) (BURLAGA *et al.*, 1981).

A Figura 3 mostra a representação gráfica das componentes B_A , B_T e B_R e o módulo do campo magnético de uma nuvem magnética ideal, construída a partir da solução analítica do modelo livre de força.

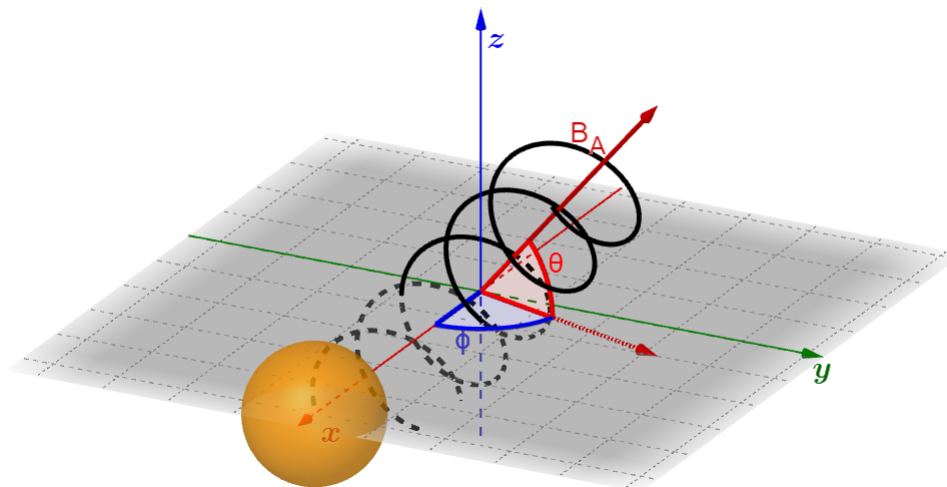
Figura 3 – Gráfico das componentes simuladas B_A em vermelho, B_T em azul, B_R em magenta e o módulo do campo magnético total em preto, de uma nuvem magnética.



FONTE: Adaptado Figura 11 de González *et al.* (2013).

A Figura 4 representa um cilindro ideal considerando o modelo livre de força com relação aos eixos cartesianos do sistema GSE (do inglês *Geocentric Solar Ecliptic*). Nesta representação didática, observe que o Sol é uma esfera centrada no ponto do eixo Ox com abscissa máxima, B_A é o eixo da hélice, ϕ é posicionado entre o eixo Ox e a projeção de B_A no plano xOy , e θ é posicionado entre a mesma projeção de B_A e o eixo da hélice. Para facilitar a visualização 3D, veja que $\phi < 90^\circ$ e $\theta < 90^\circ$ e então B_A não está contido

Figura 4 – Representação do sistema de coordenadas de uma nuvem magnética em relação aos eixos cartesianos do sistema Sol - Terra. Observe que B_A é o eixo da hélice, ϕ está entre o eixo Ox e a projeção de B_A no plano xOy , e θ está entre a mesma a projeção de B_A e o eixo da hélice.



FONTE: do Autor.

em nenhum dos planos coordenados. Também, a Terra seria uma esfera com centro sobre o eixo Ox e o plano xOy é o plano da eclíptica.

Nesse contexto, a relação entre os eixos cartesianos e o sistema de coordenadas GSE, é dada pelo sistema de equações (GONZÁLEZ *et al.*, 2017a)





$$\begin{cases} x = R \cos \phi \cos \theta, \\ y = R \sin \phi \cos \theta, \\ z = R \sin \theta. \end{cases} \quad (2.36)$$

sendo ϕ e θ ângulos longitudinal e latitudinal, respectivamente, e R é o raio da nuvem.

O tipo de tubo de fluxo é definido pela direção do campo magnético alinhado à corrente elétrica, que passa pela seção transversal do tubo (MARUBASHI, 1986). Neste contexto, quando o eixo do tubo de fluxo é quase paralelo ao plano de eclíptica ($|\theta| \leq 45^\circ$) a componente B_z muda de sinal durante a passagem pelo satélite. Isso caracteriza um tubo de fluxo bipolar. Neste caso, tem-se os tipos de tubo SWN, SEN, NES e NWS. A Figura 5 apresenta 5 linhas com características correspondentes aos respectivos tubos de fluxo bipolares. As linhas 2, 3 e 4 trazem informações sobre as componentes B_y e B_z do campo. A linha 5 apresenta o sentido da rotação do vetor campo magnético, que no caso, é indicado pela mão, podendo ser, esquerda (LH), ou direita (RH). Por exemplo, a passagem do tubo SWN pelo satélite descreve a rotação do vetor de Sul (S) para Norte (N) no sentido Oeste(W). Quando o eixo apresenta alta inclinação ($|\theta| > 45^\circ$) em relação ao plano de eclíptica, a componente B_z não muda de sinal durante sua passagem pelo satélite. Isso caracteriza um tubo de fluxo unipolar. Neste caso, tem-se os tipos de tubo WNE, ESW, ENW e WSE. A Figura 5 apresenta 5 linhas com características correspondentes





aos respectivos tubos de fluxo unipolares. As linhas 2, 3 e 4 trazem informações sobre as componentes B_y e B_z do campo. A linha 5 apresenta o sentido da rotação, também chamada de helicidade, do vetor campo magnético, que no caso, é indicado pela mão, podendo ser, esquerda (LH), ou direita (RH). Por exemplo, a passagem do tubo WNE pelo satélite descreve a rotação do vetor de Oeste (W) para Leste (E) localizado no hemisfério Norte (N) (BOTHMER; SCHWENN, 1994; BOTHMER; SCHWENN, 1998; MULLIGAN; RUSSELL; LUHMANN, 1998; HUTTUNEN *et al.*, 2005).

Figura 5 – O eixo do tubo de fluxo é quase paralelo ao plano de eclíptica ($|\theta| \leq 45^\circ$) a componente B_z muda de sinal durante a passagem pelo satélite, caracterizando um tubo bipolar. Neste caso, tem-se os tipos de tubo SWN, SEN, NES e NWS.

Magnetic Cloud Type				
	SEN	SWN	NES	NWS
Leading Field	South (-Bz)	South (-Bz)	North (+Bz)	North (+Bz)
Axial Field	East (+By)	West (-By)	East (+By)	West (-By)
Trailing Field	North (+Bz)	North (+Bz)	South (-Bz)	South (-Bz)
Helicity	LH	RH	RH	LH

FONTE: Adaptado de (BOTHMER; SCHWENN, 1998).

Figura 6 – o eixo apresenta alta inclinação ($|\theta| > 45^\circ$) em relação ao plano de eclíptica, a componente B_z não muda de sinal durante sua passagem pelo satélite, caracterizando um tubo de fluxo unipolar. Neste caso, tem-se os tipos de tubo WNE, ESW, ENW e WSE.

Magnetic Cloud Type				
	WNE	ESW	ENW	WSE
Leading Field	West (-By)	East (+By)	East (+By)	West (-By)
Axial Field	North (+Bz)	South (-Bz)	North (+Bz)	South (-Bz)
Trailing Field	East (+By)	West (-By)	West (-By)	East (+By)
Helicity	RH	RH	LH	LH

FONTE: Adaptado de (BOTHMER; SCHWENN, 1998).

O modelo livre de força é apropriado para descrever que a estrutura do tubo de

fluxo pode ser inferida pelos resultados do Método da Mínima Variância (MVA) (BURLAGA *et al.*, 1981; SONNERUP; CAHILL L. J., 1967; BOTHMER; RUST, 1997; BOTHMER; SCHWENN, 1998; HUTTUNEN *et al.*, 2005), que é descrito na próxima seção.

2.3 Método da Mínima Variância

O Método da Mínima Variância (MVA) consiste de um caso particular do Método das Componentes Principais (PCA) (PEARSON, 1901; KELLY, 1977; DONG *et al.*, 2006; ABDI; WILLIAMS, 2010). O PCA consiste em uma transformação linear ortogonal que torna um conjunto de dados correlacionados em um conjunto de valores de dados sem correlação, chamados de componentes principais (JOLLIFFE, 2002; SILVA *et al.*, 2016). O objetivo é apurar uma grande quantidade de dados identificando e selecionando os mais importantes sem perder a essência das informações. Em outros termos, o método transforma um espaço \mathbb{R}^m em outro de mesma dimensão, de modo a acumular a variabilidade dos dados nas primeiras k coordenadas ($k \leq m$). Isso permite a redução do espaço \mathbb{R}^m para \mathbb{R}^k sem perda de informação relevante.

A aplicação da PCA a dados em \mathbb{R}^3 para redução da dimensionalidade pode não ser necessária. Porém, dessa aplicação emanam propriedades geométricas importantes para a caracterização do conjunto de dados. Assim, justifica-se a interpretação de PCA como MVA ($m = k = 3$) e a aplicação ao estudo de nuvens magnéticas. Nesse contexto, aplica-se o método PCA ao conjunto de vetores $\vec{B} = (B_x, B_y, B_z)$ que representam o campo magnético da nuvem magnética medido *in situ* por um satélite no meio interplanetário. Como resultado, obtém-se um novo sistema de coordenadas em que seus eixos apontarão para a direção de máxima, média e de mínima variância (BURLAGA, 1988; KLEIN; BURLAGA, 1982; ECHER; GONZALEZ; ALVES, 2006). Isso pois, segundo Burlaga *et al.* (1981), somente duas componentes de \vec{B} mudam, sendo que uma encontra a direção de mínima variância com a passagem da nuvem pelo satélite e as outras componentes mudam conforme a rotação espiral de \vec{B} no plano de máxima variância.

Portanto, segundo Sonnerup e Scheible (1998) modela-se uma nuvem magnética ideal como um cilindro, no qual sua seção transversal representa o plano de máxima variância do vetor campo magnético $\vec{B} \in \mathbb{R}^3$, sendo $\vec{n} \in \mathbb{R}^3$ o vetor normal para este plano. Para estimativa de $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$, aplica-se o método da mínima variância (MVA) em observações de \vec{B} , obtidas via satélite.

Denotando o conjunto de observações por $\{\vec{B}^{(i)}\}_{i=1}^N$, o método determina \vec{n} no qual $\{\vec{B}^{(i)} \cdot \vec{n}\}_{i=1}^N$ possui mínima variância. Por fim, para minimizar a equação de variância, tomam-se $|\vec{n}| = 1$ e $\langle \cdot \rangle$ como operador média, e minimiza-se a equação

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\vec{B}^{(i)} \cdot \vec{n})^2 - (\langle \vec{B} \cdot \vec{n} \rangle)^2. \quad (2.37)$$

O método MVA e o modelo livre de força são duas metodologias muito utilizadas no estudo de nuvens magnéticas. O MVA é um problema clássico de autovalores e autovetores que realiza a projeção dos dados medidos *in situ* em um novo sistema de coordenadas bidimensional, representando da melhor maneira possível, um corte transversal do cilindro proposto pelo modelo livre de força.

Cabe aqui uma interpretação geométrica da Equação (2.37) e da solução de sua minimização. Nesta equação, o vetor \vec{n} é a incógnita e a minimização busca o conjunto de pontos críticos que resultam em $\sigma \simeq 0$. Com isso, obtém-se como solução três autovetores \vec{x}_1 , \vec{x}_2 e \vec{x}_3 e correspondentes autovalores λ_1 , λ_2 e λ_3 . Ordenados conforme $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$, tem-se que \vec{x}_1 é a direção de maior variabilidade das medições do satélite para o campo magnético (\vec{B}), enquanto \vec{x}_3 é a menor. Logo, os vetores \vec{x}_1 e \vec{x}_3 pertencem ao plano de máxima (plano de secção transversal). Ao substituir \vec{n} por \vec{x}_1 , na Equação (2.37), obtém-se idealmente $\sigma = 0$ devido à simetria do cilindro. Isso pois, o produto escalar $\vec{B}^{(i)} \cdot \vec{x}_1$ varia entre zero e o módulo de um dos vetores $\vec{B}^{(i)}$ quando tomados $\vec{B}^{(i)}$ numa semi-circunferência. Essa sequência de produtos escalares é parte crescente e parte decrescente, enquanto as subtrações com a média $\langle \vec{B} \cdot \vec{n} \rangle$ parte é negativa e parte é positiva. Assim, os termos no somatório se cancelam.

Na Figura 7 tem-se uma representação esquemática para melhor compreensão desta situação ideal, na qual pode-se notar que

$$0 = \vec{B}^1 \cdot \vec{x}_1 \leq \vec{B}^2 \cdot \vec{x}_1 \leq \dots \leq \vec{B}^5 \cdot \vec{x}_1 = |\vec{B}^5| \geq \vec{B}^6 \cdot \vec{x}_1 \geq \dots \geq \vec{B}^9 \cdot \vec{x}_1 = 0,$$

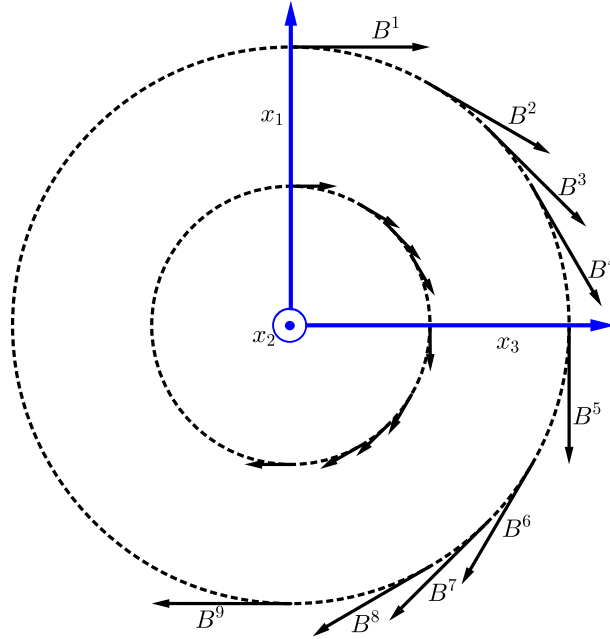
bem como $(\vec{B}^1 \cdot \vec{x}_1 - \langle \vec{B} \cdot \vec{x}_1 \rangle)$ e $(\vec{B}^5 \cdot \vec{x}_1 - \langle \vec{B} \cdot \vec{x}_1 \rangle)$ são opostos; $(\vec{B}^2 \cdot \vec{x}_1 - \langle \vec{B} \cdot \vec{x}_1 \rangle)$ e $(\vec{B}^4 \cdot \vec{x}_1 - \langle \vec{B} \cdot \vec{x}_1 \rangle)$ também são opostos, enquanto $(\vec{B}^3 \cdot \vec{x}_1 - \langle \vec{B} \cdot \vec{x}_1 \rangle) = 0$; e assim sucessivamente. Fato similar ocorre ao substituir \vec{n} por \vec{x}_3 . De outro modo, o autovetor \vec{x}_2 é normal a \vec{x}_1 e \vec{x}_3 , logo seu produto escalar com $\vec{B}^{(i)}$ é aproximadamente nulo em todas as parcelas do somatório da Equação (2.37). Com isso, \vec{x}_2 é aproximadamente normal aos vetores do campo e, finalmente, \vec{x}_2 corresponde ao eixo da nuvem.

O desenvolvimento a seguir não se trata de uma nova descrição do MVA, mas um detalhamento do que encontramos em [Sonnerup e Scheible \(1998\)](#). Para minimizar a Equação (2.37), vamos utilizar o método dos multiplicadores de Lagrange, que permite encontrar extremos (máximos e mínimos) de uma função de uma ou mais variáveis suscetíveis a uma ou mais restrições ([STEWART, 2013](#)).

Definição 1 *Sejam $f, g : A \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ funções diferenciáveis e $A \subset \mathbb{R}^n$ um aberto. Para determinar os pontos extremos de f restrito à condição $g(x) = 0$, forma-se a combinação linear:*

$$\Lambda(x) = f(x) + \lambda g(x) \tag{2.38}$$

Figura 7 – Representação esquemática da seção transversal do modelo cilíndrico para nuvem ideal. Os vetores campo magnético B^i estão em preto e as soluções do MVA x_i em azul. O símbolo \odot indica que o vetor x_2 está saindo do plano do papel.



FONTE: do Autor.

onde $\lambda \in \mathbb{R}$. Consideremos o sistema de $n + 1$ equações:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Lambda}{\partial x_i}(x) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ g(x) = 0. \end{cases} \quad (2.39)$$

Desse modo, minimizar a Equação (2.37) equivale a resolver o sistema de equações (2.39) aplicado à função

$$\Lambda(n_x, n_y, n_z) = \sigma^2(n_x, n_y, n_z) - \lambda(|\hat{n}|^2 - 1) \quad (2.40)$$

que pode ser escrito da seguinte forma

$$\begin{cases} \frac{\partial \Lambda}{\partial n_x} = \frac{\partial \sigma^2}{\partial n_x}(n_x, n_y, n_z) - \frac{\partial \lambda}{\partial n_x}(|\hat{n}|^2 - 1) = 0 \\ \frac{\partial \Lambda}{\partial n_y} = \frac{\partial \sigma^2}{\partial n_y}(n_x, n_y, n_z) - \frac{\partial \lambda}{\partial n_y}(|\hat{n}|^2 - 1) = 0 \\ \frac{\partial \Lambda}{\partial n_z} = \frac{\partial \sigma^2}{\partial n_z}(n_x, n_y, n_z) - \frac{\partial \lambda}{\partial n_z}(|\hat{n}|^2 - 1) = 0 \end{cases} \quad (2.41)$$

Desenvolvendo o sistema (2.41) e usando a notação $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N B^i = \langle B_{xyz} \rangle$, (somente para simplificação do texto), obtemos o sistema de equações diferenciais.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma^2}{\partial n_x}(n_x, n_y, n_z) = & 2[(\langle B_x B_x \rangle - \langle B_x \rangle \langle B_x \rangle) n_x + (\langle B_y B_x \rangle - \langle B_y \rangle \langle B_x \rangle) n_y \\ & + (\langle B_z B_x \rangle - \langle B_z \rangle \langle B_x \rangle) n_z] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma^2}{\partial n_y}(n_x, n_y, n_z) = & 2[((B_x B_y)^- \langle B_x \rangle \langle B_y \rangle) n_x + ((B_y B_y)^- \langle B_y \rangle \langle B_y \rangle) n_y \\ & + ((B_z B_y)^- \langle B_z \rangle \langle B_y \rangle) n_z] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma^2}{\partial n_z}(n_x, n_y, n_z) = & 2[((B_x B_z)^- \langle B_x \rangle \langle B_z \rangle) n_x + ((B_y B_z)^- \langle B_y \rangle \langle B_z \rangle) n_y \\ & + ((B_z B_z)^- \langle B_z \rangle \langle B_z \rangle) n_z] \end{aligned}$$

Ainda,

$$\begin{cases} \frac{\partial \lambda}{\partial n_x}(n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 - 1) = 2\lambda n_x \\ \frac{\partial \lambda}{\partial n_y}(n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 - 1) = 2\lambda n_y \\ \frac{\partial \lambda}{\partial n_z}(n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 - 1) = 2\lambda n_z \end{cases} \quad (2.42)$$

Substituindo o sistema de equações diferenciais acima e as Equações (2.42) no sistema (2.39), obtemos o sistema matricial

$$\sum_{\mu, \nu=1}^3 M_{\mu\nu}^B n_\nu = \lambda n_\nu \quad (2.43)$$

onde $\mu, \nu = 1, 2, 3$, denotam as componentes cartesianas, e

$$M_{\mu\nu}^B = \begin{pmatrix} B_x B_x^- \langle B_x \rangle \langle B_x \rangle & B_y B_x^- \langle B_y \rangle \langle B_x \rangle & B_z B_x^- \langle B_z \rangle \langle B_x \rangle \\ B_x B_y^- \langle B_x \rangle \langle B_y \rangle & B_y B_y^- \langle B_y \rangle \langle B_y \rangle & B_z B_y^- \langle B_z \rangle \langle B_y \rangle \\ B_x B_z^- \langle B_x \rangle \langle B_z \rangle & B_y B_z^- \langle B_y \rangle \langle B_z \rangle & B_z B_z^- \langle B_z \rangle \langle B_z \rangle \end{pmatrix}. \quad (2.44)$$

Resolver o sistema de equações (2.43) é equivalente a encontrar os autovalores λ_1, λ_2 e λ_3 e seus respectivos autovetores \vec{x}_1, \vec{x}_2 e \vec{x}_3 da matriz $M_{\mu\nu}^B$. Nesse contexto, ao resolver o sistema, são encontrados os autovalores que correspondem à variação máxima, média e mínima dos dados proporcionais aos valores de seus módulos. O autovetor associado ao autovalor médio dá a direção do eixo da nuvem. Para esta solução, a equivalência computacional da matriz de covariância, dada na Equação (2.44) é usada com

$$M_{\mu\nu}^B = E^T E / N, \quad (2.45)$$

onde E é a matriz de dados de satélite original, E^T é sua transposição e N é o número total de dados.

O nosso interesse é encontrar o autovetor intermediário que seja solução para o sistema de equações (2.43). Para tanto, o próximo passo é mostrar que a variância é uma forma quadrática e que a matriz $M_{\mu\nu}^B$ é simétrica.

Teorema 1 A equação da variância, σ^2 , dada em (2.37), pode ser reescrita em termos da matriz de covariância $M_{\mu\nu}^B$:

$$\sigma^2 = \sum_{\mu\nu} n_\mu M_{\mu\nu}^B n_\nu. \quad (2.46)$$

Para demonstrar este teorema, vamos desenvolver as duas formas da variância (2.37) e (2.46) e mostrar a identidade delas. Da equação (2.37), temos

$$\begin{aligned} \sigma^2 = & \langle B_1^2 \rangle n_1^2 + \langle B_2^2 \rangle n_2^2 + \langle B_3^2 \rangle n_3^2 \\ & + 2n_1n_2 \langle B_1B_2 \rangle + 2n_1n_3 \langle B_1B_3 \rangle + 2n_2n_3 \langle B_2B_3 \rangle \\ & - \langle B_1 \rangle^2 n_1^2 - \langle B_2 \rangle^2 n_2^2 - \langle B_3 \rangle^2 n_3^2 \\ & - 2n_1n_2 \langle B_1 \rangle \langle B_2 \rangle - 2n_1n_3 \langle B_1 \rangle \langle B_3 \rangle - 2n_2n_3 \langle B_2 \rangle \langle B_3 \rangle \end{aligned}$$

e fazendo alguns ajustes

$$\begin{aligned} \sigma^2 = & n_1^2(\langle B_1^2 \rangle - \langle B_1 \rangle^2) + n_2^2(\langle B_2^2 \rangle - \langle B_2 \rangle^2) + n_3^2(\langle B_3^2 \rangle - \langle B_3 \rangle^2) \\ & + 2n_1n_2(\langle B_1B_2 \rangle - \langle B_1 \rangle \langle B_2 \rangle) + 2n_1n_3(\langle B_1B_3 \rangle - \langle B_1 \rangle \langle B_3 \rangle) \\ & + 2n_2n_3(\langle B_2B_3 \rangle - \langle B_2 \rangle \langle B_3 \rangle). \end{aligned} \quad (2.47)$$

Desenvolvendo a equação (2.46), temos

$$\begin{aligned} \sigma^2 = & n_1 \langle B_1B_1 \rangle n_1 - n_1 \langle B_1 \rangle \langle B_1 \rangle n_1 + n_1 \langle B_1B_2 \rangle n_2 - n_1 \langle B_1 \rangle \langle B_2 \rangle n_2 \\ & + n_1 \langle B_1B_3 \rangle n_3 - n_1 \langle B_1 \rangle \langle B_3 \rangle n_3 + n_2 \langle B_2B_1 \rangle n_1 - n_2 \langle B_2 \rangle \langle B_1 \rangle n_1 \\ & + n_2 \langle B_2B_2 \rangle n_2 - n_2 \langle B_2 \rangle \langle B_2 \rangle n_2 + n_2 \langle B_2B_3 \rangle n_3 - n_2 \langle B_2 \rangle \langle B_3 \rangle n_3 \\ & + n_3 \langle B_3B_1 \rangle n_1 - n_3 \langle B_3 \rangle \langle B_1 \rangle n_1 + n_3 \langle B_3B_2 \rangle n_2 - n_3 \langle B_3 \rangle \langle B_2 \rangle n_2 \\ & + n_3 \langle B_3B_3 \rangle n_3 - n_3 \langle B_3 \rangle \langle B_3 \rangle n_3, \end{aligned}$$

fazendo alguns reduções algébricas

$$\begin{aligned} \sigma^2 = & n_1^2(\langle B_1^2 \rangle - \langle B_1 \rangle^2) + n_2^2(\langle B_2^2 \rangle - \langle B_2 \rangle^2) + n_3^2(\langle B_3^2 \rangle - \langle B_3 \rangle^2) \\ & + 2n_1n_2(\langle B_1B_2 \rangle - \langle B_1 \rangle \langle B_2 \rangle) + 2n_1n_3(\langle B_1B_3 \rangle - \langle B_1 \rangle \langle B_3 \rangle) \\ & + 2n_2n_3(\langle B_2B_3 \rangle - \langle B_2 \rangle \langle B_3 \rangle). \end{aligned} \quad (2.48)$$

E concluímos, verificando a igualdade entre as equações (2.47) e (2.48).

Visto que as formas da variância dadas até aqui são equivalentes, vamos estudar o comportamento geométrico da variância a partir da Equação (2.46).

$$\begin{aligned} \sigma^2 = & n_1 M_{11}^B n_1 + n_1 M_{12}^B n_2 + n_1 M_{13}^B n_3 \\ & + n_2 M_{21}^B n_1 + n_2 M_{22}^B n_2 + n_2 M_{23}^B n_3 \\ & + n_3 M_{31}^B n_1 + n_3 M_{32}^B n_2 + n_3 M_{33}^B n_3. \end{aligned}$$

Resultando em:

$$\sigma^2 = \hat{n}^T M \hat{n}. \quad (2.49)$$

Observe que a Equação (2.49) caracteriza a variância, σ^2 , na direção de \hat{n} como uma forma quadrática real em que $M_{\mu\nu}^B$ é uma matriz simétrica real (LIPSCHUTZ, 1994).

Teorema 2 *Seja M uma matriz quadrada real e simétrica. Então:*

- (a) *Os autovalores de M (λ) são reais.*
- (b) *Os autovetores de M são dois a dois ortogonais.*
- (c) *Existe uma matriz ortogonal P tal que $D = P^{-1}MP$, onde D é uma matriz diagonal.*

Observação: Podemos escolher as colunas da matriz P acima com autovetores ortogonais normalizados de M , então os elementos diagonais de D são os autovalores correspondentes. Ora, se P é uma matriz ortogonal, então $P^T = P^{-1}$. No caso, $D = P^{-1}MP = P^T MP$, que corresponde à uma mudança ortogonal de coordenadas para M . Neste contexto, a matriz $M_{\mu\nu}^B$ é ortogonalmente semelhante à sua forma diagonalizada D , obtida pela transformação para a base de autovetores, ou seja,

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \hat{n}^T D \hat{n} \\ &= \begin{bmatrix} n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

resultando em

$$\sigma^2 = n_1^2 \lambda_1 + n_2^2 \lambda_2 + n_3^2 \lambda_3 \quad (2.50)$$

onde $n_i = \hat{n} \cdot x_i, i = 1, 2, 3$.

Definição 2 *Definimos como espaço de variância o lugar geométrico formado pelos vetores x_1, x_2 e x_3 no qual a variância*

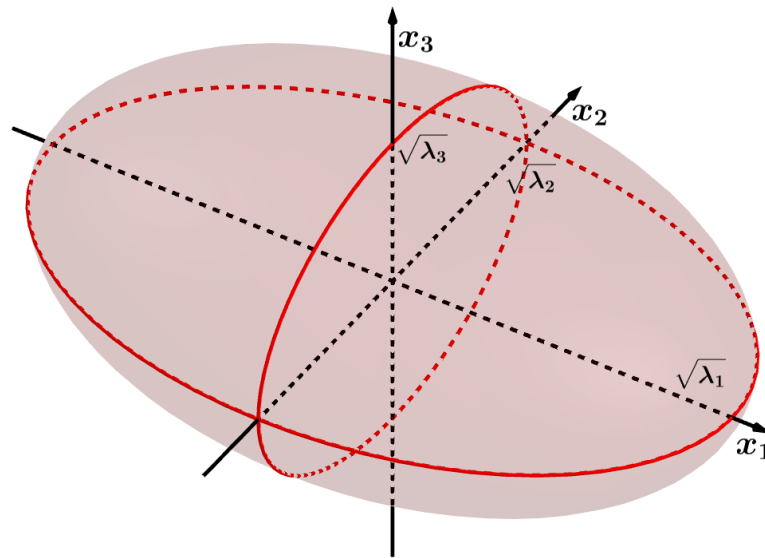
$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 \quad (2.51)$$

é a distância da origem sob a condição de normalização $|\hat{n}|^2 = n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 = 1$.

Assim, comparando as igualdades (2.50) e (2.51), obtemos $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i} n_i$ e

$$\frac{\sigma_1^2}{\lambda_1} + \frac{\sigma_2^2}{\lambda_2} + \frac{\sigma_3^2}{\lambda_3} = 1. \quad (2.52)$$

Figura 8 – Representação do *espaço de variância* como um elipsoide usando a Equação (2.52).



FONTE: Adaptado de [Sonnerup e Scheible \(1998\)](#).

A Equação (2.52) define o espaço de variância com um elipsoide (ver Figura 8). Os eixos principais estão na direção dos autovetores ortogonais, dois a dois, cujos comprimentos são $\sqrt{\lambda_1}$, $\sqrt{\lambda_2}$ e $\sqrt{\lambda_3}$.

A distância ao longo da direção escolhida arbitrariamente no *espaço de variância* desde a origem até a interseção da linha radial, ao longo da direção da superfície do elipsoide, representa o desvio padrão do componente do campo magnético ao longo da direção escolhida ([SONNERUP; SCHEIBLE, 1998](#)).

2.4 Validação da implementação do MVA

De modo geral, todos os resultados obtidos nesta pesquisa baseiam-se em experimentos computacionais, que foram desenvolvidos e implementados para esse trabalho de tese, com o auxílio de parceiros. Esses experimentos são construídos usando linguagem *Python* (versão 3.5.1 ou superior) para programação geral. Para tanto, a principal biblioteca é a *NumPy* ([WALT; COLBERT; VAROQUAUX, 2011](#)) utilizada para operações matemáticas básicas e manipulações dos dados, organizados em matrizes. As visualizações gráficas são geradas utilizando a biblioteca *Matplotlib* ([HUNTER, 2007](#)), enquanto *Pandas* ([MCKINNEY, 2010](#)) é utilizada para análise estatística. Outra importante biblioteca utilizada é a *Tkinter* que permite desenvolver interfaces gráficas e é biblioteca nativa do *Python*.

Um exemplo de implementação importante é o método MVA. Esta implementação foi construída baseada na sequência de Equações (2.42)-(2.45). Para sua validação, utilizou-se as nuvens magnéticas catalogadas por [Huttunen et al. \(2005\)](#) para o ano 2000,

com duração maior que 12 h. Considerando também a mesma resolução temporal, foram utilizados dados de campo magnético interplanetário (IMF, do inglês *interplanetary magnetic field*) com resolução de 1 h a partir do satélite ACE (*Advance Composition Explorer*³ (SMITH *et al.*, 1998)). De modo geral, essa é uma baixa resolução temporal para esse tipo de análise, porém a resolução foi escolhida devido à comparação direta com Huttunen *et al.* (2005).

A Tabela 1 organiza os resultados desse teste preliminar contendo nas primeiras duas colunas o início e o fim dos eventos, seguido pelo valor normalizado dos autovalores λ_2 e λ_3 , a razão $\lambda_2\lambda_3^{-1}$ (limiar de Lepping e Behannon (1980)) calculada nesse trabalho e a mesma razão apresentada em Huttunen *et al.* (2005).

Tabela 1 – Validação do algoritmo de MVA através da análise das nuvens magnéticas catalogadas por Huttunen *et al.* (2005) para o ano 2000, com duração superior a 12 h. As duas primeiras colunas apresentam o início e o fim dos eventos, seguidas dos autovalores λ_2 e λ_3 normalizados. As duas últimas colunas contêm as razões calculadas neste trabalho e as razões segundo Huttunen *et al.* (2005).

MC início (M/D UT)	MC fim (M/D UT)	λ_2	λ_3	$\lambda_2\lambda_3^{-1}$ (nossos resultados)	$\lambda_2\lambda_3^{-1}$
2/21 14	2/22 12	0.231	0.056	4	5
7/11 23	7/13 2	0.278	0.031	9	9
7/15 19	7/16 12	0.396	0.051	8	8
7/28 18	7/29 10	0.661	0.017	39	39
7/31 22	8/1 12	0.166	0.036	5	5
8/10 20	8/11 8	0.080	0.013	6	6
8/12 5	8/13 2	0.513	0.018	28	28
9/17 23	9/18 14	0.423	0.075	6	6
10/3 15	10/4 14	0.239	0.022	11	12
10/13 17	10/14 13	0.129	0.030	4	4
10/29 0	10/29 23	0.193	0.029	7	7
11/6 22	11/7 15	0.189	0.008	22	21

FONTE: do Autor.

Comparando as colunas 5 e 6 na Tabela 1, é possível verificar a validade da implementação. Os valores obtidos em nosso cálculo para razão dos autovalores são próximos aos valores apresentados em Huttunen *et al.* (2005). Isso permite o uso desta implementação computacional para o MVA nos experimentos descritos no Capítulo 4.

³ homepage: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/index.html> accessed on May 20, 2019.

3 Dados e Metodologia

Este capítulo consiste em apresentar a metodologia do trabalho. Para tanto, é dividido em três seções. Na Seção 3.1 é organizado a obtenção dos dados dos satélites ACE e WIND, utilizados nesta tese. Na Seção 3.2 é apresentado o desenvolvimento do método da mínima variância e sua interpretação geométrica. Na Seção 3.3 realiza-se o estudo da geometria tridimensional do modelo livre de força para indicação de correções na saída tradicional do MVA.

3.1 Dados

De modo geral, os dados analisados nesta pesquisa são medições vetoriais do campo magnético interplanetário (IMF). Esses dados são obtidos pelos satélites ACE e WIND. Nas subseções a seguir são detalhadas as características desses satélites e como os dados foram obtidos.

3.1.1 Dados do satélite ACE

Segundo informações da página da missão¹, a sonda *Advanced Composition Explorer* (ACE) foi lançada em 12 de dezembro 1997 com objetivo de monitorar fluxos de partículas a partir do Sol ou outras fontes estelares e galáticas. O ACE orbita no ponto de Lagrange L1, ou seja, no ponto de equilíbrio gravitacional Terra-Sol, a uma distância de cerca de $1,5 \times 10^6$ km da Terra (ver Figura 9). Devido a isso, o ACE tem visão privilegiada do objeto de estudo desta pesquisa, ou seja, o vento solar.

Em relação aos instrumentos, o satélite ACE possui seis sensores de alta resolução e três instrumentos de monitoramento posicionados como ilustrado no painel (b) da Figura 9. Desses, são utilizados nessa pesquisa os dados do instrumento MAG que mede direção e magnitude do IMF, conforme Smith *et al.* (1998).

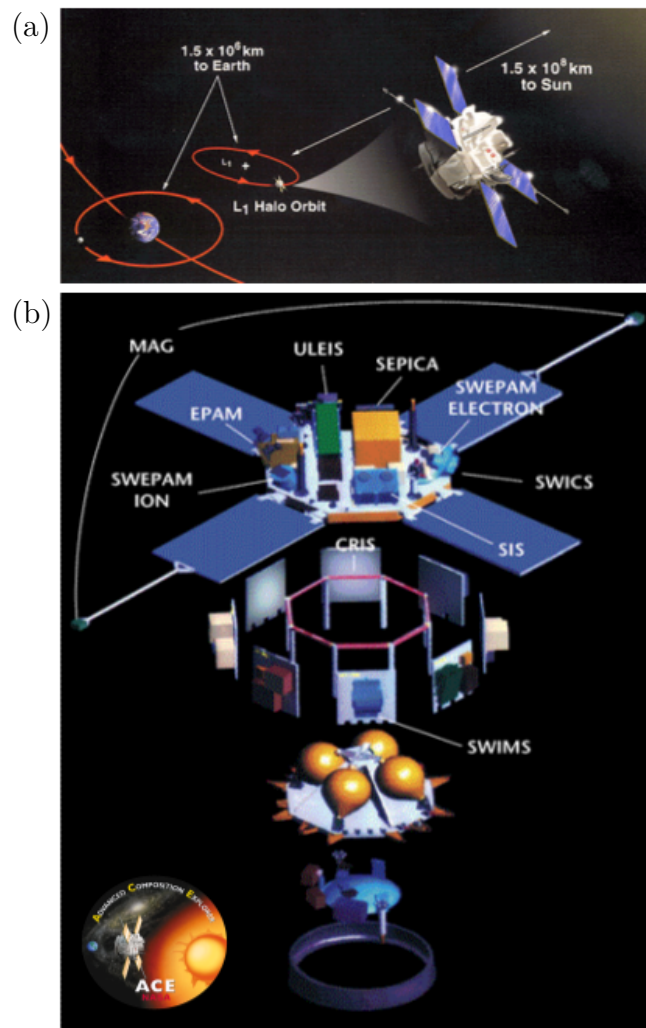
Os dados obtidos pelo ACE são disponibilizados *on-line* pelo *ACE Science Center* (ASC)². Esse centro tem por finalidade facilitar o trabalho colaborativo com os dados da missão. Uma vez que os trabalhos não são restritos a pesquisadores financiados pelo projeto ACE, também é responsabilidade do ASC arquivar e disponibilizar os dados a qualquer público com acesso à internet.

Devido às características desta pesquisa, os dados foram baixados em arquivos anualizados. A sequência de passos para esse *download* inicia no acesso à página dos dados

¹ http://www.srl.caltech.edu/ACE/ace_mission.html, acesso em 31/10/2019.

² <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/>, acesso em 31/10/2019.

Figura 9 – Representação artística do satélite ACE. O painel (a) mostra detalhes da órbita do satélite ACE no ponto de Lagrange L1. O painel (b) é uma representação do satélite ACE com indicação dos dez instrumentos a bordo. Nesta pesquisa são utilizados apenas os dados do instrumento MAG e SWEPAM.



Fonte: Christian e Davis (1997).

de nível 2 (“*Level2*”) do ASC e na escolha do instrumento de interesse, no caso “MAG”. Na sequência visualiza-se a página conforme Figura 10. Nessa página, os parâmetros foram definidos como segue:

1. resolução de 4 minutos (“*4 Minute Averages*”);
2. arquivos anualizados (“*Yearly Data Files*”);
3. ano 2018, por exemplo (“*Year 2018*”);
4. seleção de itens disponíveis:
 - Tempo (UT): ano, dia, hora, minuto, segundo;
 - Campo Magnético (nT): $\langle |B| \rangle$, $B_x(GSE)$, $B_y(GSE)$, $B_z(GSE)$;

- Início: 18/1;
- Fim: 18/365;
- *Download* de arquivo texto.

Figura 10 – Visualização de exemplo da página de *download* dos dados do satélite ACE.

Accessing data from: [mag_data_4min_year2018.hdf](#)

MAG 4-minute Averaged Interplanetary Magnetic Field Data.

Select the data items you want to retrieve.
For more information, click on items in the first column.

Time (UT)	<input checked="" type="checkbox"/> year	<input checked="" type="checkbox"/> day	<input checked="" type="checkbox"/> hour	<input checked="" type="checkbox"/> min	<input checked="" type="checkbox"/> sec
	<input type="checkbox"/> year (float)	<input type="checkbox"/> day (float)	<input type="checkbox"/> ACEepoch	<input type="checkbox"/> SC clock	
Magnetic Field (nT)	<input type="checkbox"/> B _R (RTN)	<input type="checkbox"/> B _T (RTN)	<input type="checkbox"/> B _N (RTN)		
	<input checked="" type="checkbox"/> < B >	<input type="checkbox"/> RTN Lat.	<input type="checkbox"/> RTN Long.		
	<input checked="" type="checkbox"/> B _x (GSE)	<input checked="" type="checkbox"/> B _y (GSE)	<input checked="" type="checkbox"/> B _z (GSE)		
	<input type="checkbox"/> B _x (GSM)	<input type="checkbox"/> B _y (GSM)	<input type="checkbox"/> B _z (GSM)	<input type="checkbox"/> delta-B (rms)	<input type="checkbox"/> sigma-B
Quality flags	<input type="checkbox"/> fraction good	<input type="checkbox"/> # Data points	<input type="checkbox"/> Quality		
Spacecraft Position	<input type="checkbox"/> GSE_x	<input type="checkbox"/> GSE_y	<input type="checkbox"/> GSE_z		
	<input type="checkbox"/> GSM_x	<input type="checkbox"/> GSM_y	<input type="checkbox"/> GSM_z		

or [check here to select all the data](#)

Starting "YR/DOY": Ending "YR/DOY": (Example: 98/37, note: no leading zeros)

Choose Data Format: X-Y Plot Text file download Text on Screen

FONTE: Preparada pelo autor a partir de <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/>.

Obtém-se o arquivo tipo “txt” escolhendo a opção *Text file download* e clicando no botão *Retrieve data*. Com isso, cada arquivo baixado contém dados de um ano completo e as implementações computacionais são responsáveis por localizar cada evento de interesse no arquivo, dependendo do contexto específico em estudo. A Figura 11 apresenta fragmentos do arquivo correspondente ao ano de 2018. Na imagem pode-se observar a presença de cabeçalho padrão com informações detalhadas sobre o arquivo (a partir do termo “BEGIN METADATA”) e a matriz dos dados organizados segundo parâmetros definidos na página de *download* (a partir do termo “BEGIN DATA”). No exemplo da Figura 11 há nove colunas contendo: ano, dia, hora, minuto, segundo e as medições do equipamento MAG (magnitude, coordenadas x, y e z do campo magnético no sistema GSE).

Em suma, o exemplo de parâmetros descrito no item 4 e visualizado na Figura 10 resultou no arquivo observado na Figura 11. Vale destacar, ainda, que a informação “dia” utilizada refere-se ao DOY (do inglês, *day of year*), como tradicionalmente utilizado nesse contexto.

Para os resultados apresentados na Seção 4.1 foram utilizadas medições das componentes do IMF, B_x , B_y , B_z (em coordenadas GSE), com resolução de 4 minutos. Por outro lado, para os resultados apresentados na Seção 4.3 foram utilizados, além das me-

Figura 11 – Visualização de exemplo de arquivo de dados do satélite ACE.

```

BEGIN METADATA
MAG 4-minute Averaged Interplanetary Magnetic Field Data
Data downloaded from ACE Science Center on Fri Nov 1 09:44:39 2019
MAG Team Software Version: 2.0
MAG Team Time/Date Processed:

ACE Science Center Level2 Software Version: 1.4
ACE Science Center Processing Date/Time: Wed Aug 28 14:04:20 PDT 2019

Note: All timestamps are UT, and refer to the start of the time period.
year,day,hr,min,sec: year, day of year, hour of day, minutes, seconds.
fp_year      : fractional year.
fp_doy       : fractional day-of-year.
|
.
.
.

year day hr min sec Bmag Bgse_x Bgse_y Bgse_z
BEGIN DATA
2018 1 0 0 0.000 8.3233e+00 -7.0130e+00 2.3738e+00 -3.7549e+00
2018 1 0 4 0.000 9.0447e+00 -7.9946e+00 2.9223e+00 -2.9862e+00
2018 1 0 8 0.000 9.6206e+00 -8.4101e+00 3.6668e+00 -2.5906e+00
2018 1 0 12 0.000 9.7720e+00 -8.0303e+00 5.3308e+00 8.4737e-01
2018 1 0 16 0.000 9.3571e+00 -7.8860e+00 4.0431e+00 1.1167e+00
2018 1 0 20 0.000 8.6935e+00 -7.9907e+00 2.2883e+00 2.3564e+00

```

FONTE: Preparada pelo autor após *download* de <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/>.

dições das componentes do IMF, parâmetros, obtidos pelo instrumento SWEPAM, de densidade de próton (N_p em cm^{-3}), temperatura de prótons na componente radial (T_p em graus Kelvin), a razão alphas/prótons ($Alpha_ratio$), velocidade de próton (V_p em km/s); neste caso com resolução de 64 segundos. Quando necessário, os gráficos de β de plasma e as componentes latitudinal B_{lat} e longitudinal B_{long} foram calculadas a partir dos dados com base em [Bothmer e Schwenn \(1998\)](#).

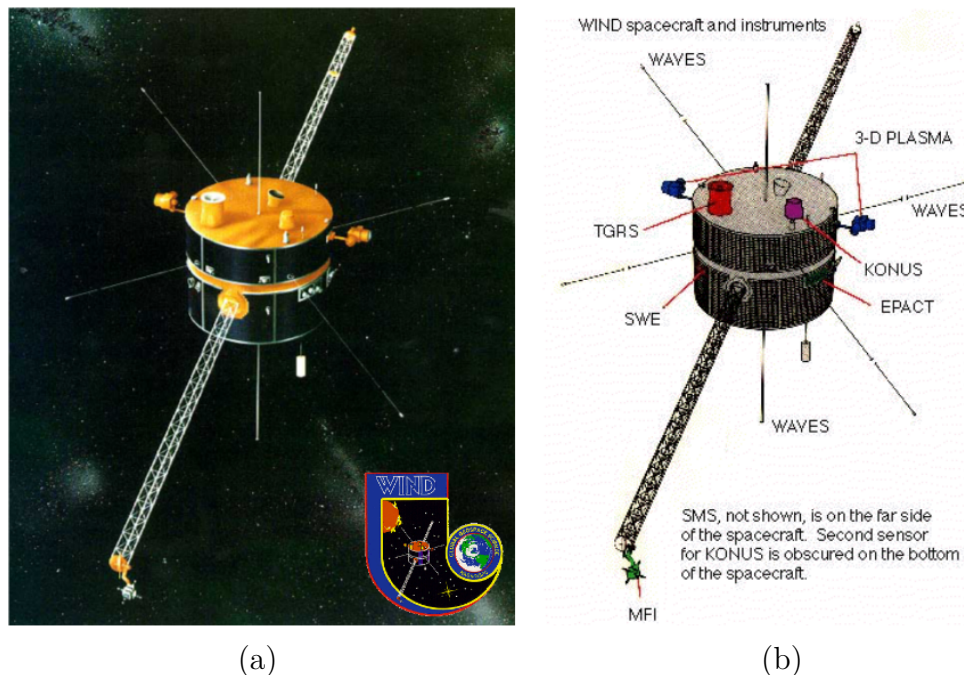
3.1.2 Dados do satélite WIND

Baseado em informações da página da missão³, o satélite WIND (*Comprehensive Solar Wind Laboratory for Long-Term Solar Wind Measurements*) foi lançado no final de 1994. Após várias órbitas na magnetosfera, o satélite foi posicionado em órbita em torno do ponto lagrangeano L1 no início de 2004. O WIND possui diversos instrumentos, como se vê na Figura 12. Dentre eles, esta pesquisa utiliza dados do MFI (*Wind Magnetic Field Investigation*) que é similar ao instrumento MAG presente no ACE. Devido a essas características, os dados obtidos pelo WIND são utilizados em parte deste trabalho em comparação a resultados obtidos baseados no ACE.

Como os dados são públicos, para *download* deve-se acessar a página da missão e selecionar os parâmetros desejados. Um exemplo de tela com esses parâmetros consta na

³ <https://wind.nasa.gov/> Acesso em 01/11/2019.

Figura 12 – Representação artística do satélite WIND (painel (a)) e indicação esquemática dos instrumentos a bordo no mesmo satélite (painel (b)).



Fonte: Christian e Davis (1997).

Figura 13. Para atingir essa tela, pode-se utilizar os seguintes passos:

1. Acessar https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public/;
2. Marcar o satélite de interesse (“WIND”) e clicar “Submit”;
3. Marcar a resolução de interesse (“OMNI HRO 1MIN”) e clicar “Submit”;
4. Preencher início e fim (p.ex. 2018/01/01 00:00:00.000 a 2018/12/31 23:59:00.000);
5. Marcar que deseja dados em arquivo txt (“List Data” e “Output listing times”);
6. Marcar os dados desejados (MAG, Bx, By e Bz em coordenadas GSE) e clicar “Submit”.

Esses parâmetros foram utilizados pois os experimentos realizados com os dados do WIND consideraram resolução de 1 minuto. Além disso, duas características utilizadas aqui são diferentes das utilizadas para ACE. A informação de início e fim do evento na página de *download* deve ser inserida no formato “YYYY/MM/DD HH:MM:SS.mmm”, enquanto a identificação de tempo em cada medição do instrumento no arquivo é baseada no segundo do ano (“*Secs-of-year*”).

Com isso, os dados obtidos a partir do satélite WIND são organizados em arquivos anualizados. Como se vê na Figura 14, sua estrutura apresenta um cabeçalho de identificação com descrição das características do arquivo e os dados organizados em uma tabela

Figura 13 – Visualização de exemplo da página de *download* dos dados do satélite WIND.

FONTE: Preparada pelo autor a partir de https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public/.

com uma linha de títulos e uma linha indicando as unidades. Ou seja, observa-se que as duas primeiras colunas identificam instante da medição, com as informações de ano (“*Year*”) e segundos do ano (“*Secs-of-year*”), enquanto as demais apresentam magnitude e as coordenadas do campo magnético em nT . Na sequência, as linhas apresentam as medições do instrumento MFI, propriamente ditas.

Da mesma forma que para os dados do ACE, as implementações utilizadas nessa pesquisa interpretam algumas informações constantes no cabeçalho dos arquivos e localiza os eventos desejados a partir das entradas de início e fim do evento. Essa busca é baseada nas primeiras colunas, ou seja, nas propriedades temporais das medições descritas no arquivo.

Em suma e a título de exemplo, realizou-se o *download* do ano 2018 e a última tela de definição de parâmetros na página pode ser vista na Figura 13. O resultado desse *download* é o arquivo cujo fragmento é apresentado na Figura 14.

Nessa pesquisa, os dados do satélite WIND foram utilizados para os resultados apresentados na Seção 4.1. Nesse caso, foram utilizadas medições das componentes do IMF, B_x , B_y , B_z (em coordenadas GSE), com resolução de 1 minuto.

Os três achatamentos propostos influenciam a interpretação da geometria do elipsoide. Portanto, basta analisar a relação entre os eixos e o eixo intermediário, $\sqrt{\lambda_2}$, para classificar a geometria do esferoide:

- se $\sqrt{\lambda_2}$ se aproxima de $\sqrt{\lambda_1}$: *Esferoide Oblato*;
- se $\sqrt{\lambda_2}$ se aproxima de $\sqrt{\lambda_3}$: *Esferoide Prolato*.
- se $\sqrt{\lambda_2} \simeq \sqrt{\lambda_1} \simeq \sqrt{\lambda_3}$: *Esférico*.

Assim, buscando envolver os três eixos na mesma métrica, propõe-se a utilização de:

$$P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = 100 \times \frac{(\sqrt{\lambda_1} - \sqrt{\lambda_3})(\sqrt{\lambda_1} - \sqrt{\lambda_2})(\sqrt{\lambda_2} - \sqrt{\lambda_3})}{\sqrt{(\lambda_1)^3}}, \quad (3.2)$$

que é o produto entre os achatamentos relativos a cada eixo. O fator de multiplicação apenas facilita a interpretação numérica e gráfica da função $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$, chamada em [Oliveira et al. \(2020\)](#), *mathematical metric of degenerate eigenvalue problem*.

A partir da métrica de achatamento relativo é possível analisar os casos de degeneração e não-degeneração apenas usando os valores dos autovalores. Nas Tabelas 2 e 3, são representadas as características geométricas de superfícies de casos degenerados e não-degenerados respectivamente. As simulações foram realizadas com autovalores ordenados segundo $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ e considerando $\lambda_1 = 1$ para normalizar as comparações. As vistas gráficas dos elipsoides são organizadas em dois tipos, com os casos de elipsoides degenerados na Tabela 2 e não degenerados na Tabela 3. Em ambos os casos, existe uma tabela de gráficos com uma coluna para os autovalores, uma para visualização em três dimensões e três para as respectivas projeções nos planos XY , XZ e YZ .

A primeira linha da Tabela 2 mostra o caso com autovalores iguais, resultando em uma superfície esférica. Enquanto, na segunda linha está o caso em que $\sqrt{\lambda_2} = \sqrt{\lambda_1}$ e consiste em um esferoide oblato (aproximadamente um disco). Finalmente, na terceira linha da Tabela 2 há um caso de esferoide prolato, na qual a superfície parece um charuto (tal como *Montecristo No. 2*) ao longo do eixo X . Naturalmente, em cada um desses casos uma das métricas de achatamento é nula, portanto $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = 0$.

Na Tabela 3 estão organizados casos de elipsoides não-degenerados. Em todos os três casos, os valores de $\sqrt{\lambda_1}$, $\sqrt{\lambda_2}$ e $\sqrt{\lambda_3}$ são distintos. Para a primeira linha, o valor da métrica achatamento é $A(1.0, 0.1) = 0.684$ e o da métrica proposta é $P(1.0, 0.7, 0.1) = 5.8$. Já na segunda linha, os valores são $A(1.0, 0.3) = 0.452$ e $P(1.0, 0.5, 0.3) = 2.1$. Finalmente, para a última linha, a métrica de achatamento é $A(1.0, 0.1) = 0.684$ com $P(1.0, 0.4, 0.1) = 7.9$.

Assim, o produto do achatamento nas três dimensões diferencia os elipsoides, enquanto a métrica do achatamento em apenas uma direção não possibilita a diferenciação.

Tabela 2 – Exemplos de elipsoides degenerados. Cada coluna contém uma vista do elipsoide, enquanto cada linha contém diferentes casos de autovalores.

$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$	XYZ	Plano XY	Plano XZ	Plano YZ
(1.0, 1.0, 1.0)				
(1.0, 1.0, 0.2)				
(1.0, 0.2, 0.2)				

FONTE: do Autor.

Tabela 3 – Exemplos de elipsoides não-degenerados. Cada coluna contém uma vista do elipsoide, enquanto cada linha contém diferentes casos de autovalores.

$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$	XYZ	Plano XY	Plano XZ	Plano YZ
(1.0, 0.7, 0.1)				
(1.0, 0.5, 0.3)				
(1.0, 0.4, 0.1)				

FONTE: do Autor.

Além disso, a aplicação da métrica proposta é necessária para interpretar a proximidade da degeneração da geometria do elipsoide. No trabalho [Oliveira et al. \(2020\)](#) e nas seções a seguir, apresentamos o estudo do produto entre as métricas de achatamento relativo.

3.2.1 Experimento computacional

A fim de investigar a degeneração do MVA, foi organizado um experimento computacional aplicado aos catálogos manualmente compilados por [Richardson e Cane \(2010\)](#) (catálogo RC⁴) e [Lepping, Burlaga e Jones \(1990\)](#) (lista WIND⁵).

Uma versão atualizada do catálogo RC contém 474 ICMEs, sendo: 160 identificadas como MC2, que significa que são ICMEs que possuem MCs, 168 como MC1, que são

⁴ <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm> acessado em 20 de Maio de 2019.

⁵ https://wind.nasa.gov/mfi/mag_cloud_pub1.html acessado em 05 de fevereiro de 2021.

ICMEs com alguma característica de MCs e 146 *MC0*, que são ICMEs que não possuem características de MCs.

Para tanto, as séries temporais do conjunto de dados de IMF foram adquiridos a partir da página do satélite ACE, usando resolução temporal de 4 minutos. Para análise dos dados de campo magnético e outras variáveis, tais como densidade e velocidade de plasma, o ACE disponibiliza dados com resoluções de 4 minutos ou 64, 16 ou 1 segundos; a escolha pela resolução de 4 minutos é principalmente devido à existência mínima de *gaps* e para motivos de comparação com trabalhos anteriores do nosso grupo de pesquisa (GONZÁLEZ *et al.*, 2017a). Esse experimento utiliza as componentes do IMF B_x , B_y , B_z , em coordenadas GSE a partir do instrumento *Magnetômetro*. Para definir o início e o fim de cada evento, foi considerada a informação do catálogo RC sem modificação. Em cada evento são usados os limites conforme colunas *MC Start*, *End* quando disponíveis, e as colunas *ICME Plasma/Field Start*, *End* caso contrário.

Por outro lado, a lista WIND consiste do intervalo de início e fim de nuvens magnéticas estimados baseados em Lepping, Burlaga e Jones (1990), que assume o modelo livre de força para o campo no interior da nuvem. Cada evento é classificado usando uma sinalização de qualidade, atribuída subjetivamente pelos pesquisadores e tendo valor 1 para qualidade “excelente”, 2 para “boa” e 3 para “ruim”. Para tanto, neste trabalho, $Q1$, $Q2$ e $Q3$ são usados respectivamente para designar cada conjunto. Essa base de dados compila 106 MCs desde 1995 a 2007, sendo 19 eventos “excelentes”, 48 “bons” e 39 “ruins”.

Nesse caso, as séries temporais de IMF foram adquiridas a partir do satélite WIND, usando resolução temporal de 1 minuto. Foram usados os componentes B_x , B_y , B_z do IMF em coordenadas GSE. Enquanto o início e o fim de cada evento foi considerado a partir da lista *MC Wind* sem mudanças.

Além disso, os dados analisados apresentam alguns *gaps* que foram tratados usando interpolação linear (OJEDA *et al.*, 2005). Devido à porcentagem de *gap* ser superior a 30% os eventos de código 4, 43, 56, 68 e 69 foram desconsiderados, restando 101 eventos para análise.

Em ambos os casos, o experimento computacional é completado com a aplicação do MVA (de acordo com a Equação (2.43)) sobre o IMF de cada evento, obtido os autovalores $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$, realizada uma normalização pela divisão dos autovalores pelo maior deles, e finalmente calculando ambos: a razão $\lambda_2 \lambda_3^{-1}$ (LEPPING; BEHANNON, 1980) e a métrica proposta nessa pesquisa na Equação (3.2).

Vale destacar que a classificação $Q1$, $Q2$ e $Q3$ se refere a uma qualidade subjetiva inerente ao modelo utilizado pelos autores para identificar as nuvens. Enquanto a classificação $MC0$, $MC1$, e $MC2$ caracteriza nesta ordem: ausência, possível presença e real

presença de nuvem na ICME segundo o método utilizado por RC. Além disso, um mesmo evento pode ser observado pelos dois satélites. A diferença entre os dois parâmetros de qualidade em nada afetam a nossa metodologia para quantificar a degeneração do MVA.

3.3 Caracterização do tubo de fluxo

No estudo das nuvens magnéticas, existem pesquisas direcionadas a um ajuste ideal da geometria referente à morfologia de campo magnético do evento (GOLDSTEIN, 1983; MARUBASHI, 1986). Neste caso, o campo magnético \vec{B} satisfaz o modelo livre de força, descrito na Seção 2.2. Esse modelo foi refinado por Burlaga (1988), que mostrou que uma nuvem pode ser modelada pelo modelo *force-free* linear, ou seja, com α constante (BURLAGA, 1988; LEPPING; BURLAGA; JONES, 1990; LYNCH *et al.*, 2003; GONZÁLEZ *et al.*, 2013).

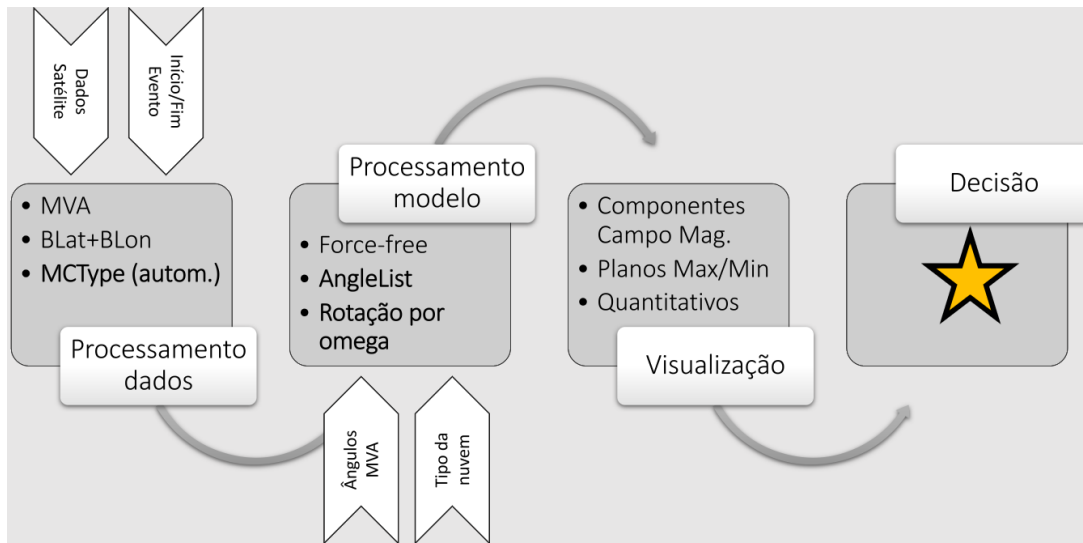
Para encontrar a orientação do eixo do cilindro do modelo *force-free*, aplica-se o método da mínima variância (MVA), descrito na Seção 2.3, em observações do campo magnético interplanetário (BURLAGA *et al.*, 1981; BOTHMER; RUST, 1997).

Além disso, para caracterizar a disposição espacial do tubo de fluxo, calculam-se as componentes latitudinal B_{lat} e longitudinal B_{lon} a partir do sinal do IMF obtido do satélite. A componente B_{lat} apresenta variação angular entre -90° e 90° e mostra o comportamento do campo magnético da nuvem na direção sul (S)-norte (N), enquanto a componente B_{lon} apresenta variação angular entre 0° e 360° , mostrando o comportamento na direção leste (E)-oeste (W).

Segundo Bothmer e Schwenn (1998), Huttunen *et al.* (2005), o tubo de fluxo pode ser classificado em 8 tipos, de acordo com a direção do eixo (ϕ, θ) obtido pelo MVA e pela rotação do vetor campo magnético no intervalo do evento. Esta classificação, conforme descrita na Seção 2.2 pode apresentar um problema, como discutido em Démoulin, Dasso e Janvier (2018), Oliveira *et al.* (2020). O MVA estima os ângulos do eixo da nuvem, especificando somente a direção do eixo, não seu sentido. Isso é afetado diretamente pelo sinal dos autovetores, uma vez que os autovalores são sempre positivos neste método, ou seja, o método MVA apresenta uma ambiguidade de 180° no eixo de mínima variância (HU; SONNERUP, 2002).

Deste modo, o objetivo do trabalho é apresentar um experimento matemático baseado na geometria das nuvens magnéticas, através do modelo *force free*. O experimento consiste em calcular os ângulos do eixo da nuvem através do MVA e corrigi-los em comparação ao modelo, ajustando-o aos dados. Além disso, determinar o tipo de tubo de forma coerente e automática. Esse processamento está organizado em uma ferramenta computacional com interface gráfica amigável para o usuário. A Figura 15 apresenta o fluxograma referente à metodologia utilizada neste processo.

Figura 15 – Fluxograma do experimento computacional de caracterização do tubo de fluxo. As etiquetas verticais indicam as informações de entrada. Cada caixa de processamento é explicada no texto da Seção 3.3. Os títulos em negrito correspondem às técnicas desenvolvidas nesta pesquisa.



FONTE: do Autor.

No início do processamento, a entrada de dados para o experimento consiste num arquivo contendo os dados de satélite B_{mag} , B_x , B_y , B_z , conforme Seção 3.1. Além disso, fornece-se o início e o fim do evento estudado (no formato AAAA/MM/DD HH:MM). Dependendo da investigação, essa última informação pode ser obtida em catálogos de eventos já identificados pela comunidade científica ou pode ser uma previsão para estudo de novos eventos. Esses itens são indicados pelas setas para baixo no canto esquerdo superior do fluxograma da Figura 15.

O fluxograma apresentado na Figura 15 é descrito nas subseções a seguir. Na Subseção 3.3.1 é apresentado a primeira etapa do processo, denominada “Processamento dos dados”. Como resultado, obtém-se os ângulos do MVA e o tipo de tubo de fluxo. Essas informações são os elementos de entrada para a próxima etapa, “Processamento do modelo”, na qual toda a metodologia é descrita na Subseção 3.3.2. Seguindo, tem-se a etapa “Visualização”, descrito na Subseção 3.3.3. Por fim, segue a etapa final intitulada “Decisão”. Esta última fase apresenta dois cenários para o usuário decidir qualitativamente o modelo ideal que melhor se aproxima da situação real. Os resultados e a utilização da ferramenta apresentados nas Seções 4.3 e 4.2 esclarecem como ocorre este último passo na prática.

3.3.1 Processamento de dados

O processamento dos dados reais se inicia com a aplicação do MVA conforme Seção 2.3. Nesta etapa, o programa obtém os autovalores λ_1 , λ_2 e λ_3 e os respectivos autovetores \vec{x}_1 , \vec{x}_2 e \vec{x}_3 . Tem-se, portanto, $\vec{x}_2 = (x_1, x_2, x_3)$ como eixo da nuvem no espaço

transformado pelo MVA. A partir das coordenadas deste vetor calculam-se os ângulos longitudinal (ϕ) e latitudinal (θ) para o eixo da nuvem, conforme Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Tabela 4 – Condições para o sinal dos componentes x_1 e x_2 do vetor $\vec{x}_2 = (x_1, x_2, x_3)$ e equação de cálculo do ângulo ϕ .

$x_1 > 0$	$x_2 \geq 0$	$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{x_2}{x_1}\right);$
$x_1 < 0$	$x_2 > 0$	$\phi = 180^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{x_2}{ x_1 }\right);$
$x_1 < 0$	$x_2 \leq 0$	$\phi = 180^\circ + \tan^{-1}\left(\frac{ x_2 }{ x_1 }\right);$
$x_1 > 0$	$x_2 < 0$	$\phi = 360^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{ x_2 }{x_1}\right);$
$x_1 = 0$	$x_2 > 0$	$\phi = 90^\circ;$
$x_1 = 0$	$x_2 < 0$	$\phi = 270^\circ;$
$x_1 = 0$	$x_2 = 0$	$\phi = 0$

FONTE: do Autor.

Tabela 5 – Condições para o sinal dos componentes x_1 , x_2 e x_3 do vetor $\vec{x}_2 = (x_1, x_2, x_3)$ e equação de cálculo do ângulo θ .

$x_1 = x_2 = 0$	$x_3 > 0$	$\theta = 90^\circ$
	$x_3 < 0$	$\theta = -90^\circ$
$x_1 \neq 0$ e	$x_1 > 0$	$\theta = \tan^{-1} \frac{ x_3 }{(x_1^2 + x_2^2)^{1/2}}$
$x_2 \neq 0$	$x_1 < 0$	$\theta = -\tan^{-1} \frac{ x_3 }{(x_1^2 + x_2^2)^{1/2}}$

FONTE: do Autor.

Tradicionalmente, os cálculos de ϕ e θ consideram apenas vetores no primeiro octante do \mathbf{R}^3 , em geral (BOTHMER; SCHWENN, 1998). O cálculo apresentado aqui amplia esse entendimento considerando o sentido do vetor eixo e sua posição tridimensional em quaisquer octante.

Ainda sobre os dados obtidos do satélite calculam-se as componentes latitudinal B_{lat} e longitudinal B_{long} do campo magnético. Essas componentes são determinantes na identificação da configuração geométrica do tubo de fluxo, descrito na Seção 2.2. A componente B_{lat} apresenta variação angular entre -90° e 90° e mostra o comportamento do campo magnético da nuvem na direção norte (N)-sul (S), enquanto a componente B_{long} apresenta variação angular entre 0° e 360° , mostrando o comportamento na direção leste (E)-oeste (W). Na literatura (BOTHMER; SCHWENN, 1998), esse cálculo é realizado utilizando as Equações (3.3) e (3.4) apresentadas a seguir

$$B_{lat} = \cot^{-1} \left(\frac{(B_x^2 + B_y^2)^{\frac{1}{2}}}{B_z} \right) \quad (3.3)$$

e

$$B_{long} = \tan^{-1}\left(\frac{B_y}{B_x}\right). \quad (3.4)$$

A Equação (3.4) necessita de cuidado com relação às componentes B_x e B_y , do mesmo modo que ocorreu para ϕ e θ . A Tabela 6 apresenta as correções propostas para o cálculo da componente B_{lon} . Observa-se que a Equação (3.4) considera apenas um dos casos descritos na proposta da Tabela 6.

Tabela 6 – Análise das componentes B_x e B_y e cálculo da componente B_{lon}

	$B_y \geq 0$	$B_{lon} = \tan^{-1}\left(\frac{B_y}{B_x}\right)$
$B_x > 0$	$B_y < 0$	$B_{lon} = 360^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{ B_y }{B_x}\right)$
	$B_y > 0$	$B_{lon} = 180^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{B_y}{ B_x }\right)$
$B_x < 0$	$B_y < 0$	$B_{lon} = 180^\circ + \tan^{-1}\left(\frac{ B_y }{ B_x }\right)$
	$B_y = 0$	$B_{lon} = 180^\circ$
	$B_y > 0$	$B_{lon} = 90^\circ$
$B_x = 0$	$B_y < 0$	$B_{lon} = 270^\circ$
	$B_y = 0$	$B_{lon} = 0$

FONTE: do Autor.

As séries temporais obtidas para B_{lat} e B_{lon} correspondem dois dos gráficos apresentados na etapa de visualização do fluxograma da Figura 15.

Por fim, no processamento dos dados oriundos do satélite ainda é aplicada a identificação automática do tipo de tubo de fluxo. Essa etapa é inovação proposta neste doutorado e recebe o nome de *MCType*. A função *MCType* realiza a identificação automática dos tipos de tubo de fluxo, que são oito, conforme Seção 2.2. Como saída, a função fornece o tipo do tubo e, conseqüentemente, o sentido da rotação do vetor campo magnético, que no caso, é indicado pela mão, podendo ser, esquerda (LH), ou direita (RH).

Uma característica importante na identificação é a polaridade dos tubos, conforme descrito na Seção 2.2. Dessa forma, os tubos são divididos em bipolares, $|\theta| \leq 45^\circ$ e unipolares, $|\theta| > 45^\circ$. Para as nuvens bipolares, a primeira caracterização é com relação à série temporal correspondente à latitude (B_{lat}), que pode ser crescente ou decrescente. Uma vez identificado isso, determina se a longitude (B_{lon}) está aproximadamente constante com valor maior ou menor que 180° . Essas análises acarretam nas quatro classificações possíveis e são organizadas na Tabela 7. Por outro lado, para as nuvens unipolares, a classificação se inicia com a longitude (B_{lon}), que pode ser crescente ou decrescente. Em seguida, o comportamento da latitude (B_{lat}) é estudado, podendo ser positivo ou negativo. Essas análises acarretam as outras quatro classificações possíveis e são organizadas na Tabela 8.

Tabela 7 – Identificação dos tubos bipolares $|\theta| \leq 45^\circ$.

Latitude	Longitude	Tubo e Mão (Direita (R), Esquerda(L))
Crescente	Maior que 180°	SWN e R
	Menor que 180°	SEN e L
Decrescente	Maior que 180°	NWS e L
	Menor que 180°	NES e R

FONTE: do Autor.

Tabela 8 – Identificação dos tubos unipolares $|\theta| > 45^\circ$.

Longitude	Latitude	Tubo e Mão (Direita (R), Esquerda(L))
Crescente	Positiva	ENW e L
	Negativa	ESW e R
Decrescente	Positiva	WNE e R
	Negativa	WSE e L

FONTE: do Autor.

3.3.2 Processamento do modelo

Uma vez identificada a geometria do tubo de fluxo a partir dos dados do satélite, busca-se sua verificação a partir do modelo livre de força, considerado ideal (conforme Seção 2.2). Para isso, é necessário realizar uma rotação dos dados simulados, por um ângulo ω em torno de um eixo de rotação adimensional, ou seja, $\vec{v} = (a, b, c)$, $|\vec{v}| = 1$. Essa rotação simula a transformação realizada pelo MVA para o novo sistema de coordenadas, ou seja, redireciona os eixos do modelo livre de força a partir dos ângulos ϕ e θ . Conforme fluxograma da Figura 15, esse processamento recebe como entrada as informações de ângulos ϕ e θ advindas do MVA e o tipo da nuvem obtido automaticamente.

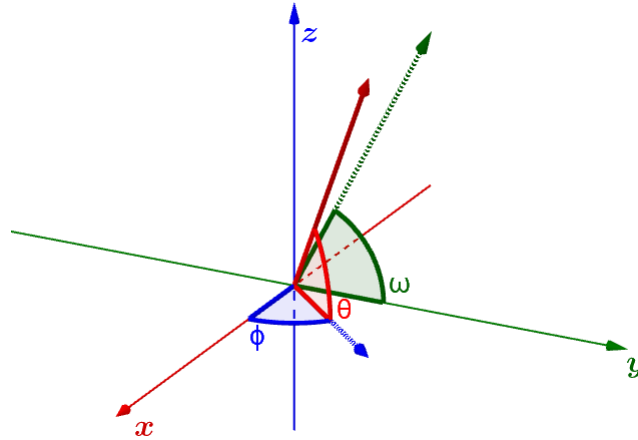
Baseado em Bothmer e Schwenn (1998), Lepping *et al.* (2006), as configurações geométricas possíveis para o modelo ideal correspondem à projeção das linhas de campo magnético no plano yOz . Mais especificamente, à projeção do eixo do cilindro ideal no plano yOz do sistema de coordenadas GSE, conforme Figura 16. Assim, propõe-se a definição do ângulo de rotação ω no plano yOz a partir dos ângulos ϕ e θ da Equação (2.36). Esse ângulo varia entre 0° e 360° e é calculado conforme Tabela 9.

A matriz que expressa uma rotação ω do sistema de coordenadas em torno de um vetor $\vec{v} = (a, b, c)$ é dada por

$$M(\vec{v}, \omega) = \begin{bmatrix} \cos \omega + (1 - \cos \omega)a^2 & (1 - \cos \omega)ab + (\sin \omega)c & (1 - \cos \omega)ac - (\sin \omega)b \\ (1 - \cos \omega)ab - (\sin \omega)c & \cos \omega + (1 - \cos \omega)b^2 & (1 - \cos \omega)bc + (\sin \omega)a \\ (1 - \cos \omega)ca + (\sin \omega)b & (1 - \cos \omega)cb - (\sin \omega)a & \cos \omega + (1 - \cos \omega)c^2 \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Especificamente, nessa abordagem, a rotação é realizada em torno do eixo \hat{x} na base

Figura 16 – Projeção do eixo do cilindro ideal (ϕ, θ) no plano yOz do sistema de coordenadas GSE. O ângulo ω é construído conforme Tabela 9.



FONTE: do Autor.

canônica, resultando na seguinte matriz de rotação:

$$M(\hat{x}, \omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Tabela 9 – Relação entre os ângulos ϕ , θ e ω . Em cada coluna ocorrem os possíveis valores para cada ângulo e, linha a linha, apresenta-se a correspondência que define o valor de ω .

$0^\circ < \theta < 90^\circ$	$0^\circ < \phi < 180^\circ$	$\omega = \theta$
	$180^\circ < \phi < 360^\circ$	$\omega = 180^\circ - \theta$
	$\phi = 0^\circ$ ou $\phi = 180^\circ$ ou $\phi = 360^\circ$	$\omega = 90^\circ$
$-90^\circ < \theta < 0^\circ$	$0^\circ < \phi < 180^\circ$	$\omega = 360^\circ + \theta$
	$180^\circ < \phi < 360^\circ$	$\omega = 180^\circ - \theta$
	$\phi = 0^\circ$ ou $\phi = 180^\circ$ ou $\phi = 360^\circ$	$\omega = 270^\circ$
$\theta = 0^\circ$	$0^\circ < \phi < 180^\circ$	$\omega = 0^\circ$
	$180^\circ < \phi < 360^\circ$	$\omega = 180^\circ$
	$\phi = 0^\circ$ ou $\phi = 180^\circ$ ou $\phi = 360^\circ$	$\nexists \omega$
$\theta = -90^\circ$	$0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$	$\omega = 270^\circ$
$\theta = 90^\circ$	$0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$	$\omega = 90^\circ$

FONTE: do Autor.

A partir das relações apresentadas na Tabela 9 obtém-se o ângulo ω de rotação no plano yOz . Observa-se que, para $\phi = 0^\circ$ e $\theta = 0^\circ$ ou $\theta = 180^\circ$ ou $\theta = 360^\circ$, não existe valor para ω , pois a projeção do eixo da nuvem corresponde a um ponto na origem do sistema. A rotação é aplicada aos dados ideais calculados para o campo magnético \vec{B} , através do modelo livre de força. Conforme descrito na Seção 2.2, as componentes B_x, B_y e B_z são calculadas usando a Equação (2.35), considerando $B_0 = 40 \text{ nT}$, $\alpha = 1$, $H = -1$ para mão direita ou $H = 1$, caso contrário. As componentes são então projetadas no plano yOz e rotacionadas por ω , resultando em B_x^*, B_y^* e B_z^* .

A investigação aqui proposta visa oferecer soluções para o sentido do eixo do tubo de fluxo, ou seja, do autovetor intermediário do MVA (KLEIN; BURLAGA, 1982). Isto se justifica pelo fato do MVA fornecer apenas a direção dos eixos do novo sistema de coordenadas, resultando assim, em oito configurações distintas do tubo de fluxo. Propõe-se portanto a função *Anglelist* para oferecer as correções possíveis para os ângulos calculados a partir do MVA. Esta função utiliza os ângulos θ e ϕ e o tipo de tubo obtidos na Subseção 3.3.1. Assim, a função *Anglelist* tem por objetivo apresentar as posições angulares do eixo da nuvem plausíveis para cada tipo conforme as Tabelas 10 e 11. Nessas tabelas, relaciona-se a informação de entrada “tipo da nuvem” com a correção automática de um dos ângulos e os cenários de saída, sendo esses formados pelo ângulo corrigido, opções de ângulos para análise e orientação da helicidade (mão direita (RH) ou mão esquerda (LH)). A Tabela 10 apresenta cada correção realizada para o ângulo θ e as respectivas opções do ângulo ϕ . Enquanto, a Tabela 11 apresenta cada correção realizada para o ângulo ϕ e as respectivas opções do ângulo θ .

Tabela 10 – Correção dos ângulos ϕ e θ de nuvens unipolares e cenários para comparação.

Tipo	Correção θ	Correção ϕ	Saída: Cenário 1	Saída: Cenário 2
ENW	Se $\theta < 0$, então $\theta = -\theta$	Se $\phi < 180$	ϕ, θ, L	$\phi + 180, \theta, L$
		Se $\phi > 180$	ϕ, θ, L	$\phi - 180, \theta, L$
ESW	Se $\theta > 0$, então $\theta = -\theta$	Se $\phi < 180$	ϕ, θ, R	$\phi + 180, \theta, R$
		Se $\phi > 180$	ϕ, θ, R	$\phi - 180, \theta, R$
WNE	Se $\theta < 0$, então $\theta = -\theta$	Se $\phi < 180$	ϕ, θ, R	$\phi + 180, \theta, R$
		Se $\phi > 180$	ϕ, θ, R	$\phi - 180, \theta, R$
WSE	Se $\theta > 0$, então $\theta = -\theta$	Se $\phi < 180$	ϕ, θ, L	$\phi + 180, \theta, L$
		Se $\phi > 180$	ϕ, θ, L	$\phi - 180, \theta, L$

FONTE: do Autor.

Tabela 11 – Correção dos ângulos ϕ e θ de nuvens bipolares e cenários para comparação.

Tipo	Correção ϕ	Saída: Cenário 1	Saída: Cenário 2
NES	Se $\phi > 180$, então $\phi = \phi - 180$	ϕ, θ, R	$\phi, -\theta, R$
NWS	Se $\phi < 180$, então $\phi = \phi + 180$	ϕ, θ, L	$\phi, -\theta, L$
SEN	Se $\phi > 180$, então $\phi = \phi - 180$	ϕ, θ, L	$\phi, -\theta, L$
SWN	Se $\phi < 180$, então $\phi = \phi + 180$	ϕ, θ, R	$\phi, -\theta, R$

FONTE: do Autor.

3.3.3 Visualização

A etapa de visualização na Figura 15 resume os resultados das duas fases de processamento. Tem-se, portanto, os gráficos das componentes do campo magnético tanto para os dados reais como para o modelo. Esses gráficos são organizados na sequência: $|B|$, B_x , B_y , B_z , B_{lat} , B_{lon} . Além disso, ocorrem os planos de máxima e de mínima variância,

respectivamente $B_z^* \times B_y^*$ e $B_y^* \times B_x^*$. Vale ressaltar que cada tipo de gráfico é triplicado na visualização sendo um correspondente aos dados baixados do satélite e outros dois correspondentes aos cenários de modelo ideal oferecidos para correção.

Por fim, o programa oferece a visualização de um quadro resumo dos resultados quantitativos. Nesse quadro, constam os autovalores e respectivos autovetores, os ângulos latitudinal e longitudinal obtidos no MVA. Além disso, há o cálculo da rotação do campo magnético (χ), a razão λ_2/λ_3 e a métrica P para degeneração. Bem como, as saídas dos processamentos automáticos desenvolvidos nessa pesquisa, que são tipo e helicidade da nuvem e pares de ângulos para cenários de decisão. Exemplos dessas visualizações são elementos do Capítulo 4 e por isso não são colocadas nesta seção.

4 Resultados e discussões

Os resultados deste trabalho agrupam-se em duas partes. A primeira, descrita na Seção 4.1 corresponde ao estudo de um novo método para estudar a degeneração do MVA. Especificamente estuda-se o comportamento estatístico da nossa métrica quando aplicada em nuvens magnéticas identificadas em catálogos. Além do mais, a métrica é comparada com outras métricas existentes na literatura. A segunda parte dos resultados, descrita na Seção 4.3 apresenta um estudo comparativo entre o método MVA e o modelo livre de força para identificar os tipos de tubos de fluxo em nuvens identificadas *in situ* em L1. Como resultado deste estudo, um programa com executável será oferecido com interface gráfica que auxiliará ao usuário caracterizar a nuvem com maior precisão. Neste processo, as fronteiras da nuvens também poderão ser melhor definidas durante a identificação.

4.1 Análise da Degeneração do MVA

A fim de analisar os casos em que ocorrem degeneração ou não do MVA, o experimento discutido e proposto na Seção 3.2 foi aplicado a duas listas de eventos disponíveis. Cada lista corresponde a um satélite descrito na Seção 3.1, e são identificadas como catálogo RC e catálogo WIND. Os resultados e as discussões estão organizadas nas subseções a seguir conforme a lista considerada.

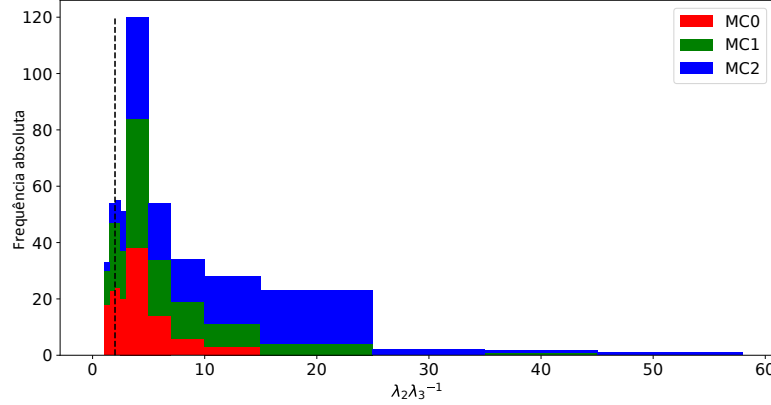
4.1.1 Catálogo RC

Essa seção apresenta a análise dos resultados da aplicação do experimento proposto em eventos de 1998 a 2017 do catálogo RC. O estudo foi conduzido considerando os 474 eventos catalogados e respectivos subconjuntos $MC0$, $MC1$ e $MC2$ dentre os ICME reportados.

A Figura 17 apresenta o histograma de frequência de valores obtidos para a razão $\lambda_2\lambda_3^{-1}$. As classes do histograma foram definidos com diferentes tamanhos conforme os seguintes intervalos: $[0, 0.5[$, $[0.5, 1[$, $[1, 1.5[$, $[1.5, 2[$, $[2, 2.5[$, $[2.5, 3[$, $[3, 5[$, $[5, 7[$, $[7, 10[$, $[10, 15[$, $[15, 25[$, $[25, 35[$, $[35, 45[$, $[45, \max(\lambda_2\lambda_3^{-1})[$. Os intervalos de classe não são uniformes devido à necessidade de uma análise mais refinada do comportamento da razão em torno do nível mais usado na literatura (ou seja, $\lambda_2\lambda_3^{-1} \geq 2$). Além disso, as cores vermelho, verde e azul presentes na Figura 17 separam os subconjuntos $MC0$, $MC1$ e $MC2$, enquanto a linha pontilhada corresponde exatamente ao limiar $\lambda_2\lambda_3^{-1} = 2$.

Sendo assim, pode-se ver na Figura 17 que existem eventos classificados como nuvens magnéticas com razão $\lambda_2\lambda_3^{-1}$ abaixo do nível definido por [Lepping e Behannon](#)

Figura 17 – Histograma (de tipo *Stacked*) $\lambda_2\lambda_3^{-1}$ para todos os eventos do catálogo RC. Em vermelho os eventos tipo *MC0*, ou seja, os ICME que não possuem nuvem magnética reportada. Em verde, *MC1* que são eventos com evidências de rotação na direção do campo, mas sem outras características de nuvens magnéticas. Em azul, *MC2* correspondente a nuvens magnéticas reportadas. A linha pontilhada corresponde ao limiar $\lambda_2\lambda_3^{-1} = 2$.



FONTE: do Autor.

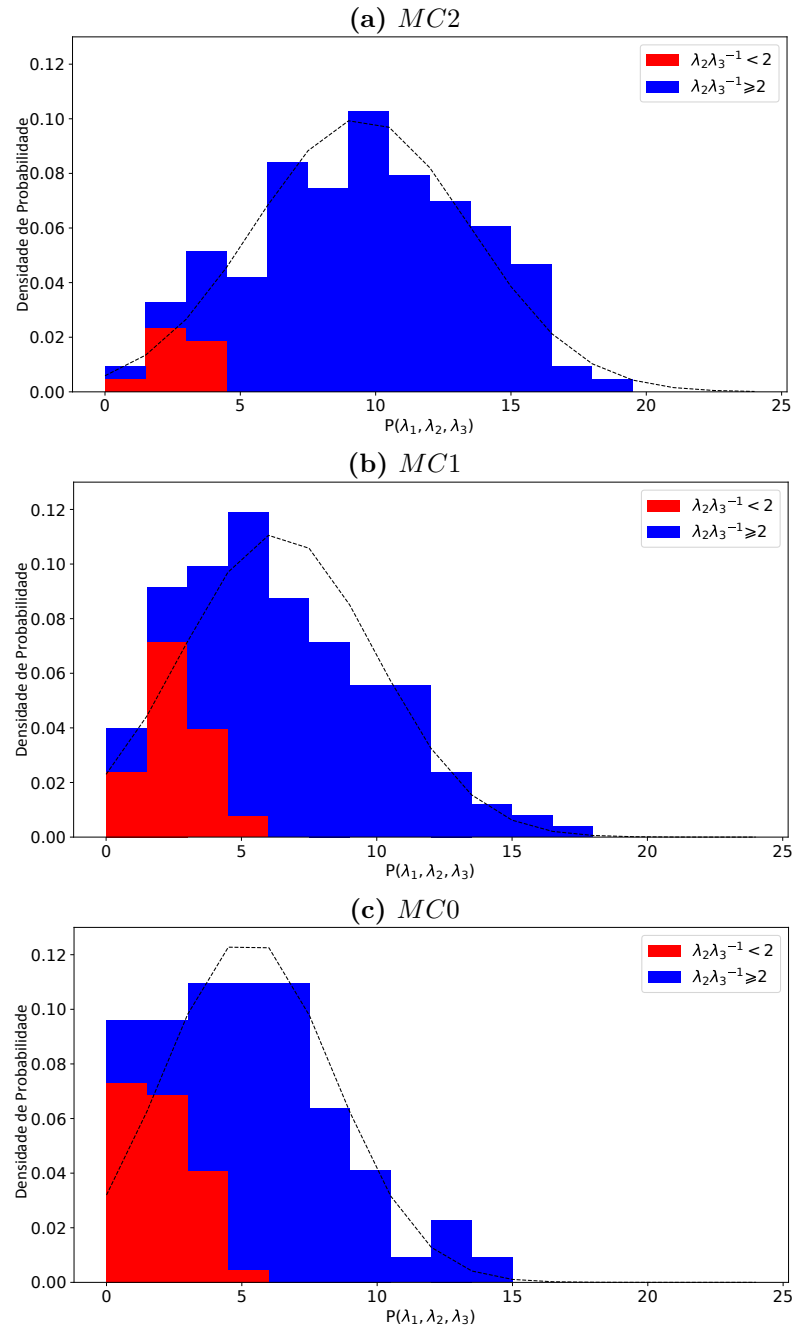
(1980). Esse resultado é esperado porque o MVA é usado para determinar a direção do eixo da nuvem magnética, não para identificar se o evento é ou não é uma nuvem magnética. Ou seja, uma MC pode ter razão $\lambda_2\lambda_3^{-1} \leq 2$ e ainda ser uma MC. Isso significa apenas que o eixo não pode ser determinado usando a técnica MVA. Detalha-se ainda na Figura 17 que existem três ocorrências de eventos *MC2* com $1,0 \leq \lambda_2\lambda_3^{-1} < 1,5$ e sete com $1,5 \leq \lambda_2\lambda_3^{-1} < 2,0$, enquanto existem 36 eventos com indícios nuvens (*MC1*) e 41 eventos que não são nuvens (*MC0*) na região de degeneração segundo Lepping e Behannon (1980). Por fim, ainda considerando os recortes, os menores valores apresentados por eventos de tipo *MC2*, *MC1* e *MC0* foram 1.20, 1.18 e 1.10, respectivamente.

De outro modo, cada gráfico na Figura 18 contém um histograma de densidade de probabilidade para a métrica $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$, cada um correspondendo a um dos grupos *MC2* (painel (a)), *MC1* (painel (b)) ou *MC0* (painel (c)), separadamente. Esses gráficos foram construídos usando intervalos de classes uniformes com tamanho 1,5 e valores de $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ entre 0 e 24. Com isso, para obter a frequência relativa de cada intervalo, basta encontrar a área da barra correspondente.

As cores representam eventos com $\lambda_2\lambda_3^{-1} < 2$, em vermelho e, $\lambda_2\lambda_3^{-1} \geq 2$, em azul, onde pode-se dizer que cada histograma corresponde a um estudo de distribuição de probabilidade condicional da métrica em relação à razão de autovalores. Na mesma Figura 18, o ajuste a distribuição Gaussiana é verificado qualitativamente. A média μ e o desvio padrão σ são calculados para todos os eventos de cada grupo *MC2*, *MC1* ou *MC0*, separadamente. A partir desses parâmetros, as linhas pontilhadas da distribuição Gaussiana são plotadas.

Analisando os três painéis, pode-se observar que o ajuste Gaussiano é melhor

Figura 18 – Histograma normalizada de tipo *stacked* da métrica proposta $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ aplicada em eventos classificados como (a) *MC2*, (b) *MC1* e (c) *MC0* segundo catálogo RC. As cores diferem eventos de acordo com a razão $\lambda_2\lambda_3^{-1}$, sendo vermelho para razão menor que 2 e azul, caso contrário. Em cada caso, a curva pontilhada corresponde a Gaussiana com (a) $\mu_2 = 9,4923$ e $\sigma_2 = 3,9884$, (b) $\mu_1 = 6,3736$ e $\sigma_1 = 3,5902$ e (c) $\mu_0 = 5,2384$ e $\sigma_0 = 3,1625$.



FONTE: do Autor.

para eventos *MC2* (Figura 18a). O histograma da Figura 18a exibe comportamento de distribuição Gaussiana com $\mu_2 = 9.4923$ e $\sigma_2 = 3.9884$. Além disso, nota-se 86% das MCs estão no intervalo $4,5 < P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) < 19,5$. Também, eventos com razão $\lambda_2\lambda_3^{-1} < 2$ estão na calda à esquerda da distribuição, enquanto menos de 7% dos eventos com $\lambda_2\lambda_3^{-1} \geq 2$ apresentam $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \leq 4,5$.

Portanto, é importante observar que, embora este estudo conclua que o limiar de Lepping e Behannon (1980) para razão de autovalores, difere dos resultados desta tese, isso não invalida trabalhos que usaram o método depois de aplicar o MVA para identificar os eixos das nuvens. Na Figura 18b e 18c ambos histogramas não mostram comportamento Gaussiano. Isso é qualitativamente verificado pela comparação das barras dos histogramas com as linhas pontilhadas das distribuições com $\mu_1 = 6,3736$, $\sigma_1 = 3,5902$ (painel (b)) e $\mu_0 = 5,2384$, $\sigma_0 = 3,1625$ (painel (c)). Porém, comparado ao intervalo identificado na análise da Figura 18a, observa-se na Figura 18b que em torno de 66% dos possíveis eventos que pode ser MC ($MC1$) estão no intervalo $4,5 < P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) < 19,5$, com apenas 1.2% com $\lambda_2\lambda_3^{-1} < 2$. Enquanto, os casos $MC0$ (painel c) diferem desse comportamento, com cerca de 45% deles fora do intervalo. Portanto, o intervalo destacado pode representar um novo limiar para a caracterização de MC, considerando a degeneração do MVA.

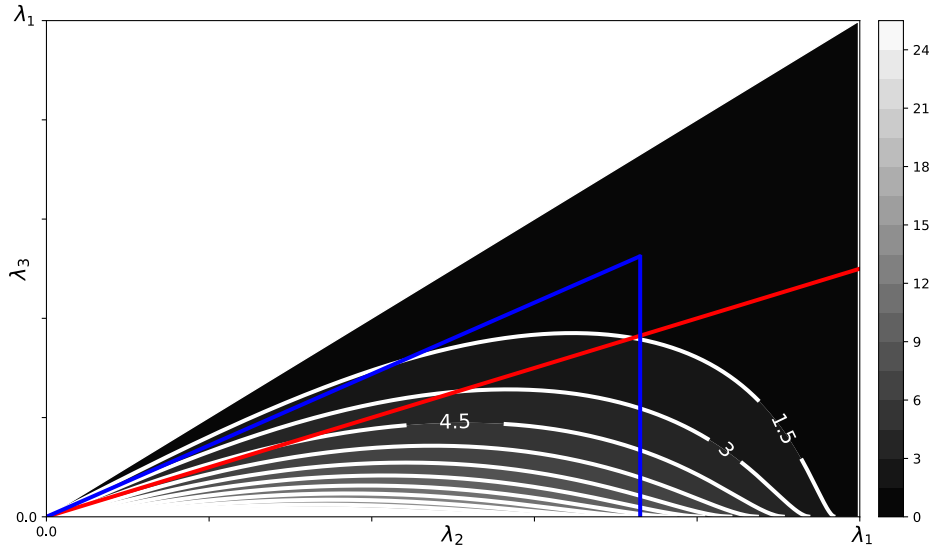
A Figura 18c mostra ainda que se um ICME não apresenta MC, então existe 72% de chances que ele atenda à condição $\lambda_2\lambda_3^{-1} \geq 2$. Isso reforça a discussão na Figura 17 sobre eventos ICME sem nuvem magnética que atendem ao limite de Lepping e Behannon (1980).

Finalmente, a Figura 19 apresenta a comparação entre os valores da métrica proposta $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ e as razões $\lambda_2\lambda_3^{-1}$ e $\lambda_2\lambda_1^{-1}$. Para construir o gráfico de linhas, utiliza-se $0 \leq \lambda_2 \leq \lambda_1$ e $0 \leq \lambda_3 \leq \lambda_1$, desde que $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$. As isolinhas em branco indicam valores constantes de $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$. A linha vermelha indica exatamente o valor $\lambda_2\lambda_3^{-1} = 2$, portanto, a região abaixo da linha vermelha corresponde à razão $\lambda_2\lambda_3^{-1} \geq 2$, isto é a região Lepping e Behannon (1980). Enquanto, a região formada pelas linhas azuis correspondem aos critérios de Siscoe e Suey (1972) (a saber, $\lambda_2\lambda_3^{-1} > 1,39$ e $\lambda_2\lambda_1^{-1} < 0,73$).

A interpretação das isolinhas na Figura 19 em relação ao MVA, consiste de que os autovalores causam espaços de variância com geometria relativamente iguais. O fato de que as curvas de nível, com valores inferiores à métrica $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$, atravessarem as linhas das razões dos autovalores, vermelhas ou azuis, mostram que essas razões não estão diretamente relacionadas com o geometria do MVA. Isso é esperado, pois Lepping e Behannon (1980), Siscoe e Suey (1972) realizaram análise estatística referente ao erro, enquanto nossa métrica se desenvolveu a partir da geometria do problema. No entanto, para valores de λ_2 e λ_3 próximos de zero, as três condições tornam-se semelhantes. Pode observar ainda que, as linhas azul e vermelha representam assíntotas para o perfil de $P = 4,5$.

Na Figura 19 mostra-se que $\lim_{\lambda_2 \rightarrow \lambda_1} P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \lim_{\lambda_2 \rightarrow \lambda_3} P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = 0$, bem como $\lim_{\lambda_2, \lambda_3 \rightarrow 0} P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = 25$, que é o valor máximo para $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$. O resultado dos dois primeiros limites era esperado, pois corresponde à definição teórica do conceito de degeneração dos autovalores, enquanto o terceiro indica que valores maiores de $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ implicam em menos degeneração do MVA.

Figura 19 – Gráfico de curvas de nível para a métrica proposta $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ e comparação com [Siscoe e Suey \(1972\)](#), [Lepping e Behannon \(1980\)](#). Para construção, $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ é calculado com $0 \leq \lambda_2 \leq \lambda_1$ e $0 \leq \lambda_3 \leq \lambda_1$, enquanto que a região $\lambda_2 < \lambda_3$ deve ser desconsiderada. Além do mais, a linha vermelha corresponde a $\lambda_2 \lambda_3^{-1} = 2$ e a linha azul corresponde a $\lambda_2 \lambda_3^{-1} = 1,39$ e $\lambda_2 \lambda_1^{-1} = 0,73$. Nesse caso, a degeneração teórica ocorre no contorno da região triangular inferior ($\lambda_2 = \lambda_1$ ou $\lambda_2 = \lambda_3$).



FONTE: do Autor.

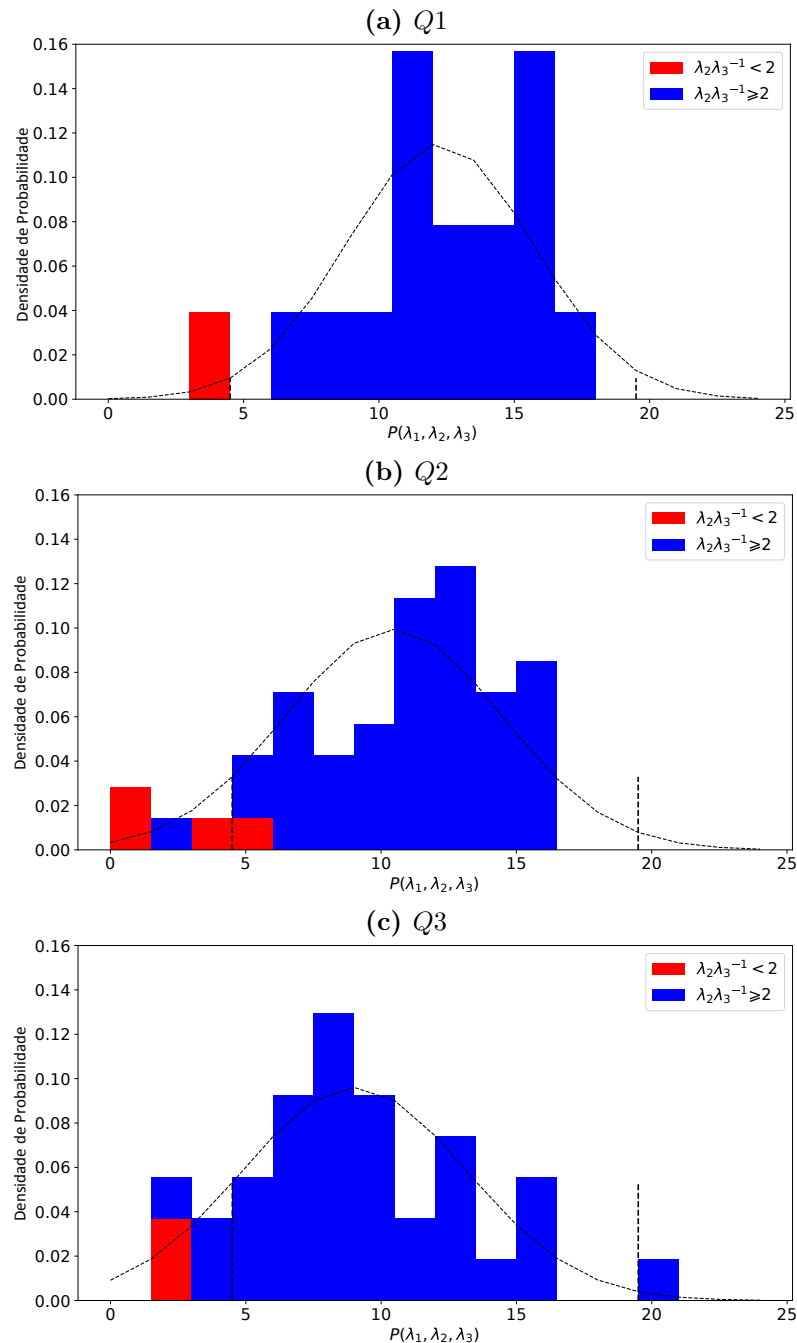
Na mesma Figura 19 pode-se perceber visualmente a intersecção de $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \geq 4,5$ e as condições [Lepping e Behannon \(1980\)](#), [Siscoe e Suey \(1972\)](#). Retomando que mais de 86% das MCs identificadas no catálogo RC ocorrem nessa intersecção, conforme discutido na Figura 18a. Esse resultado é estatisticamente significativo e indica que pode haver um limite ideal para avaliar a degeneração do autovalor a partir da métrica proposta. Portanto, o limiar de $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = 4,5$ é proposto como um valor mínimo usado para saber se o MVA possui autovalores com ou sem degeneração. Valores maiores que 4,5 serão adequados para usar o MVA de maneira confiável em estudos futuros de MC.

4.1.2 Catálogo WIND

Para complementar os resultados e avaliar sua reprodutibilidade, o experimento foi replicado com a lista WIND de MCs ([LEPPING; BURLAGA; JONES, 1990](#)). Detalhes sobre essa lista constam na Subseção 3.2.1, enquanto informações do satélite WIND são encontradas na Seção 3.1.

Os resultados são apresentados na Figura 20, que contém os histogramas de densidade de probabilidade para a métrica $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$. Cada histograma corresponde ao grupo $Q1$ (painel (a)), $Q2$ (painel (b)) ou $Q3$ (painel (c)), separadamente. Esses gráficos são construídos com as mesmas características descritas para a Figura 18. Vale ressaltar que, diferentemente do catálogo RC, todos os eventos considerados por [Lepping, Burlaga e Jones \(1990\)](#) e sua lista *on-line* são nuvens magnéticas.

Figura 20 – Histogramas normalizados de tipo *stacked* para a métrica proposta $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ aplicada a eventos classificados com qualidade (a) Excelente ($Q1$), (b) Boa ($Q2$) e (c) Ruim ($Q3$) segundo lista MC Wind. As cores diferenciam os eventos de acordo com a razão $\lambda_2\lambda_3^{-1}$, sendo vermelho para razão menor do que 2 e azul, maior ou igual do que 2. Em cada caso, a curva pontilhada corresponde à Gaussiana com (a) $\mu_{Q1} = 12,2439$ e $\sigma_{Q1} = 3,4673$, (b) $\mu_{Q2} = 10,4632$ e $\sigma_{Q2} = 4,0099$ e (c) $\mu_{Q3} = 9,0152$ e $\sigma_{Q3} = 4,1538$.



FONTE: do Autor.

Analisando a Figura 20, pode-se ver que 88% dos eventos com qualidade excelente e 85% com qualidade boa estão no intervalo $4,5 < P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) < 19,5$. Enquanto, apenas 12% dos eventos com qualidade ruim não estão neste intervalo. O ajuste à curva Gaussiana é mais evidente nos casos $Q2$ e $Q3$. No entanto, o histograma de $Q1$ contém poucos eventos, o que justifica o aparente distanciamento da curva Gaussiana. Todos os gráficos

mostram que existem eventos em que a razão $\lambda_2\lambda_3^{-1}$ é menor que 2. Nesses casos, também a métrica P é menor que 4,5. Resultados semelhantes obtidos nesta seção demonstram que a métrica é robusta por ter sido comparada a outras abordagens e aplicada a uma quantidade representativa de eventos com diferentes classificações.

4.2 Interface gráfica para usuário e sua utilização

A implementação do experimento descrito na Seção 3.3 e no fluxograma da Figura 15 foi organizada em uma interface gráfica amigável. Quando da publicação do artigo Oliveira *et al.* (2021), a ferramenta será disponibilizada como executável para utilização de outros pesquisadores.

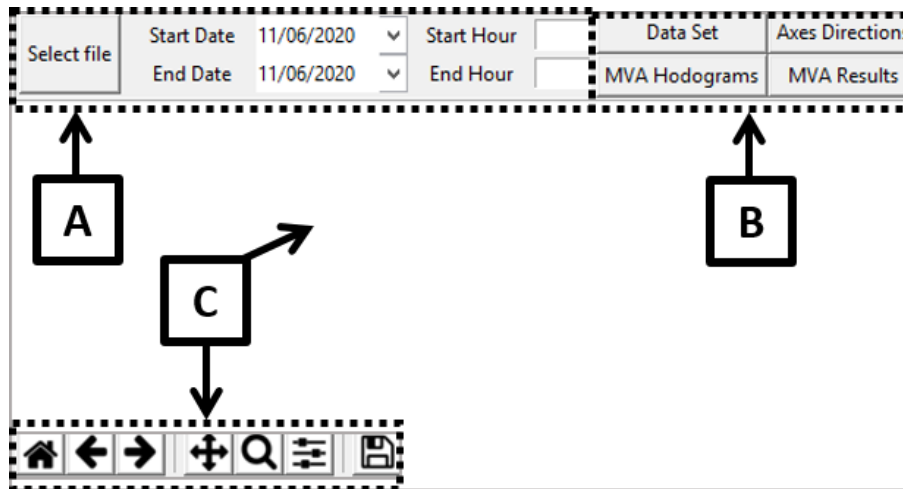
A implementação, de modo geral foi desenvolvida em Python, com suporte das bibliotecas Matplotlib (HUNTER, 2007) para visualização gráfica, NumPy (WALT; COLBERT; VAROQUAUX, 2011) para administração de matrizes e operações matemáticas e Tkinter (LUNDH, 1999) para a interface. Nesta seção, pretende-se fazer uma introdução ao uso da interface desenvolvida. Enquanto a aplicação da ferramenta para análise de eventos ocorre na Seção 4.3.

A Figura 21 mostra a tela inicial do programa. Na parte superior, existe um menu fixo para entrada de dados e seleção das opções de visualização. Na parte inferior, ocorre a barra de tarefas do Matplotlib para manipulação das visualizações da janela central. A letra **A** indica o botão e as caixas para entrada de dados. O botão “Select file” (“Seleção de arquivo”) permite a seleção do arquivo TXT obtido a partir do satélite, enquanto nas caixas, deve-se inserir as informações de início e fim do evento. A letra **B** indica os botões de exibição. A letra **C** indica o ambiente de visualização do Matplotlib, em outras palavras, a janela para imagens e os botões para manipular e gravar o resultado.

Uma vez carregado um arquivo de dados, a ferramenta provê painéis de gráficos apresentados nas análises da Seção 4.3. Na sequência, explicam-se as telas observadas para cada opção identificadas com a letra **B** na Figura 21.

Ao clicar em “Data Set” (“Conjunto de dados”), oito gráficos são obtidos diretamente dos dados do satélite sem pré-processamento. Em todos os gráficos, o tempo (DOY) está no eixo horizontal. Enquanto os eixos verticais correspondem a: H^+ densidade de próton (cm^{-3}); H^+temp temperatura de prótons (K); H^e/H^+ razão entre partículas *alphas* e prótons; H^+speed velocidade de prótons (km/s); $Beta_p$ β do plasma considerando apenas prótons; $|B|$ magnitude do campo magnético (nT); B_{lat} componente latitudinal do campo magnético; B_{lon} componente longitudinal do campo magnético. O objetivo desta visualização é verificar os parâmetros de início e fim do evento e o comportamento dos dados. Como exemplo, observe a Figura 22, que apresenta os dados de uma nuvem catalogada de 00 h de 29 de abril de 2001 até as 13 h do mesmo dia. Esse mesmo evento será considerado

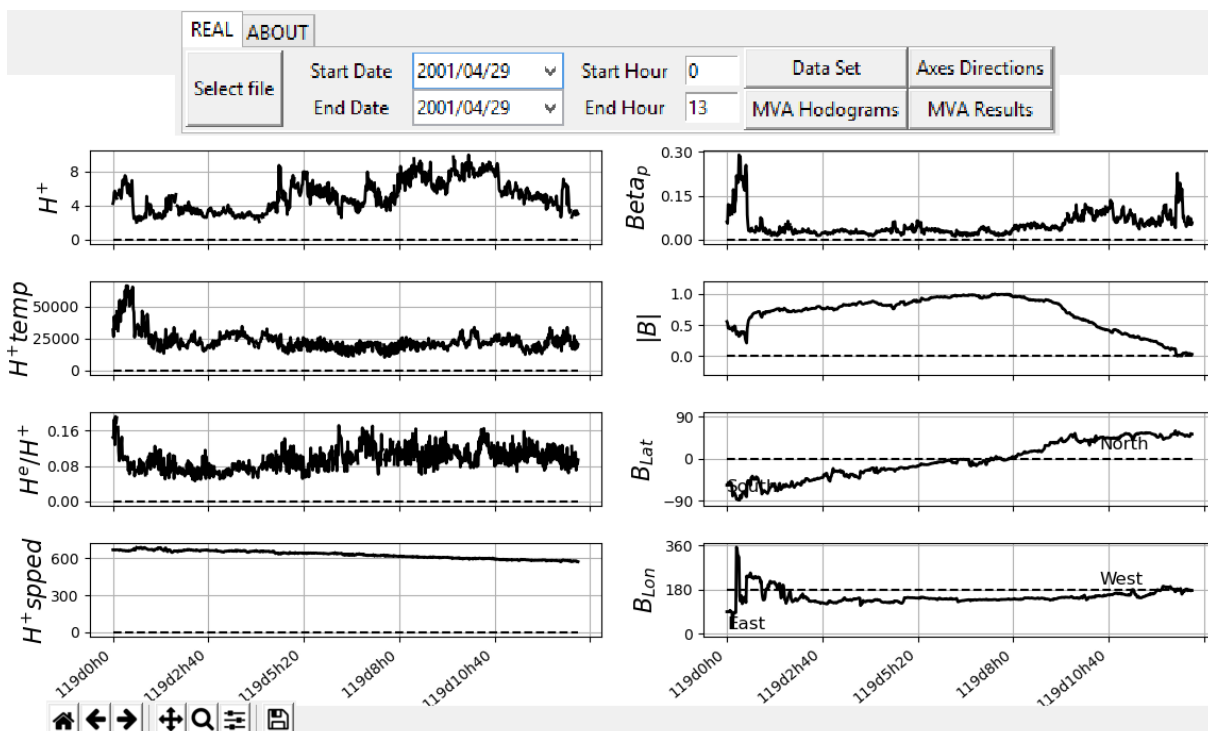
Figura 21 – Visualização da tela inicial da interface amigável desenvolvida para o experimento. A letra **A** indica a região de entrada de dados. A letra **B** indica os botões de exibição. A letra **C** indica o ambiente padrão de visualização para o Matplotlib.



FONTE: do Autor.

nas Figuras 23 e 24, bem como na Tabela 12.

Figura 22 – Janela do programa quando selecionado o botão “Data Set” para o período de 00 h em 29 de abril de 2001 às 13 h do mesmo dia. Nesse caso, o experimento completo é processado e no ambiente de visualização são observados oito gráficos: H^+ densidade de próton (cm^{-3}); H^+temp temperatura de prótons (K); H^e/H^+ razão entre partículas *alphas* e prótons; H^+speed velocidade de prótons (km/s); $Beta_p$ β do plasma considerando apenas prótons; $|B|$ magnitude do campo magnético (nT); B_{lat} componente latitudinal do campo magnético; B_{lon} componente longitudinal do campo magnético.



FONTE: do Autor.

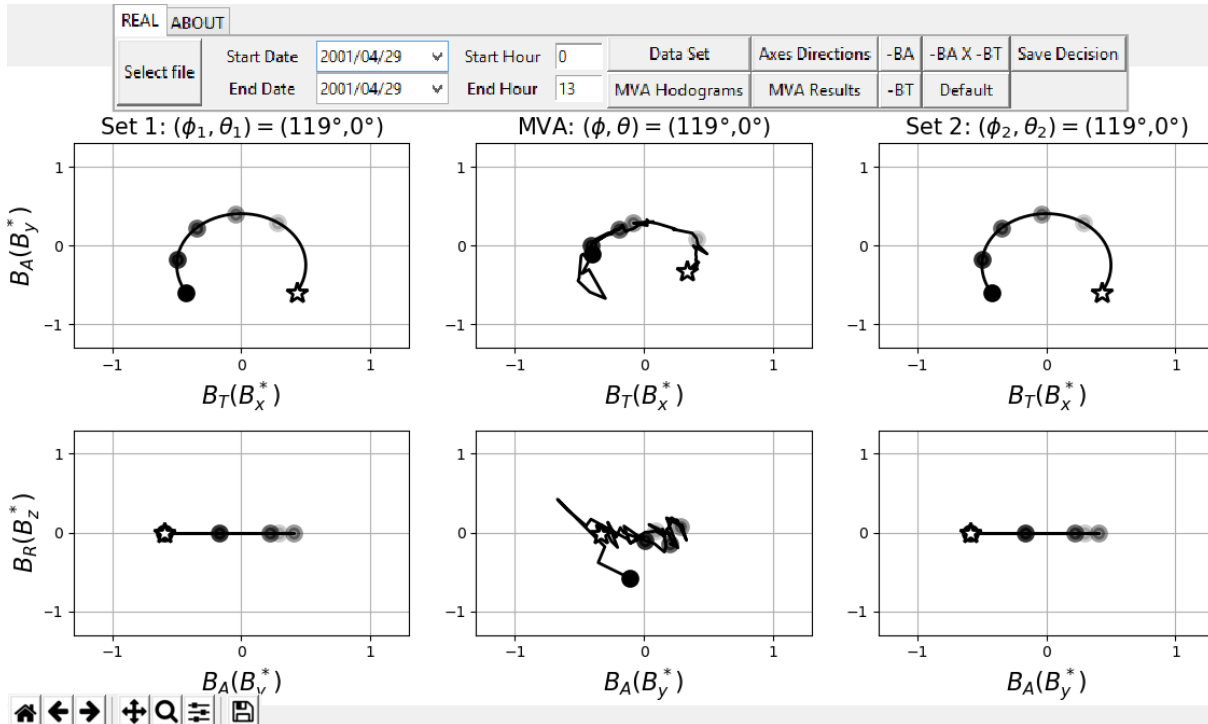
Adicionalmente, o botão “MVA Hodograms” (“Hodogramas MVA”) realiza o processamento do MVA sobre os componentes do campo magnético, o modelo livre de força e suas rotações, considerando os conjuntos de correção do MVA. A visualização dos resultados consiste em seis gráficos. Os três painéis acima são os planos de máxima variância $B_T(B_x^*) \times B_A(B_y^*)$ e os três abaixo são os planos de mínima variância $B_A(B_y^*) \times B_R(B_z^*)$. A coluna central corresponde ao resultado direto do MVA, enquanto as colunas laterais correspondem aos modelos rotacionados conforme opções dadas pela rotina *Anglelist*. Nesta tela, a lista de botões na interface é atualizada e são visíveis para o usuário as opções “-BA”, “-BT”, “-BA X -BT” e “Default” para rotação (ou não) dos eixos nos gráficos centrais. Essas opções modificam apenas os eixos dos painéis centrais, conforme identificação do botão e sua relação com o sinal dos autovetores obtidos no MVA. O objetivo desta visualização é comparar o resultado do MVA com cada um dos conjuntos de componentes ideais. Uma vez que a opção de correspondência tenha sido decidida, o usuário deve clicar em “Save Decision” (“Salvar Decisão”) para que o sistema considere esta em outros processamentos, caso contrário a opção “Default” (“Padrão”) será considerada.

Como exemplo, observe a Figura 23. Verifique a atualização e botões no canto superior direito. Esse evento foi escolhido didaticamente, uma vez que suas características são muito próximas do modelo ideal. Portanto, fica claro a escolha pela opção “Default”. Além disso, note que os dois conjuntos apresentam a mesma correspondência para os planos de máxima e mínima variância. Isso é possível porque este evento retrata uma nuvem verdadeiramente bipolar, com $\theta = 0^\circ$.

Além disso, o botão “Axes Directions” (“Direções de eixos”) mostra as coordenadas do campo magnético do evento comparado às duas rotações do modelo. A tela consiste de três colunas com seis gráficos sendo as colunas como visto em “MVA Hodograms”, enquanto cada linha contém a magnitude do campo magnético ($|B|$), suas componentes GSE (B_x , B_y , B_z) e suas componentes geográficas (B_{lat} , B_{lon}). O propósito desta tela é confirmar a decisão de melhor ajuste entre rotação do modelo e MVA. A Figura 24 mostra um exemplo dessa tela na qual observa-se as similaridades entre os gráficos referentes aos dados reais e aos gráficos dos dados modelados.

Finalmente, o botão “MVA Results” (“Resultados do MVA”) apresenta uma tabela de resultados quantitativos e qualitativos do processamento. Nesta tela, $\hat{x}_i(GSE)$ com $i = 1, 2, 3$ são os autovetores e $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ respectivos autovalores, (ϕ, θ) são os ângulos estimados pelo MVA para o eixo da MC, χ é o ângulo de rotação do campo magnético e existe a razão λ_2/λ_3 baseada em [Lepping e Behannon \(1980\)](#) e a métrica $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ baseada em [Oliveira et al. \(2020\)](#). Ambos, autovetores e ângulos do eixo da MC são modificados de acordo com a decisão registrada nas outras telas. Enquanto, (ϕ_1, θ_1) e (ϕ_2, θ_2) são os possíveis ângulos do eixo da MC, *Type* e *Handedness* são o tipo e helicidade, obtidos automaticamente pelo processo. Um exemplo dessa visualização é encontrado na

Figura 23 – Janela do programa ao selecionar o botão MVA Hodogram para o período das 00 em 29 de abril de 2001 às 13 do mesmo dia. Neste caso, o experimento completo é processado e são observados seis gráficos no ambiente de visualização. A primeira linha sendo os planos de variância máxima $B_T \times B_A$ ($\vec{B}_x^* \times \vec{B}_y^*$) e a segunda linha os planos de variância mínima $B_A \times B_R$ ($\vec{B}_y^* \times \vec{B}_z^*$). As colunas à esquerda e à direita correspondem aos conjuntos ideais e a central corresponde ao resultado do MVA (identificados pelas expressões *Set 1*, *Set 2* e *MVA*, respectivamente, no título dos gráficos). A área de botões é atualizada para análise visual da alteração no sinal do autovetor.



FONTE: do Autor.

Tabela 12.

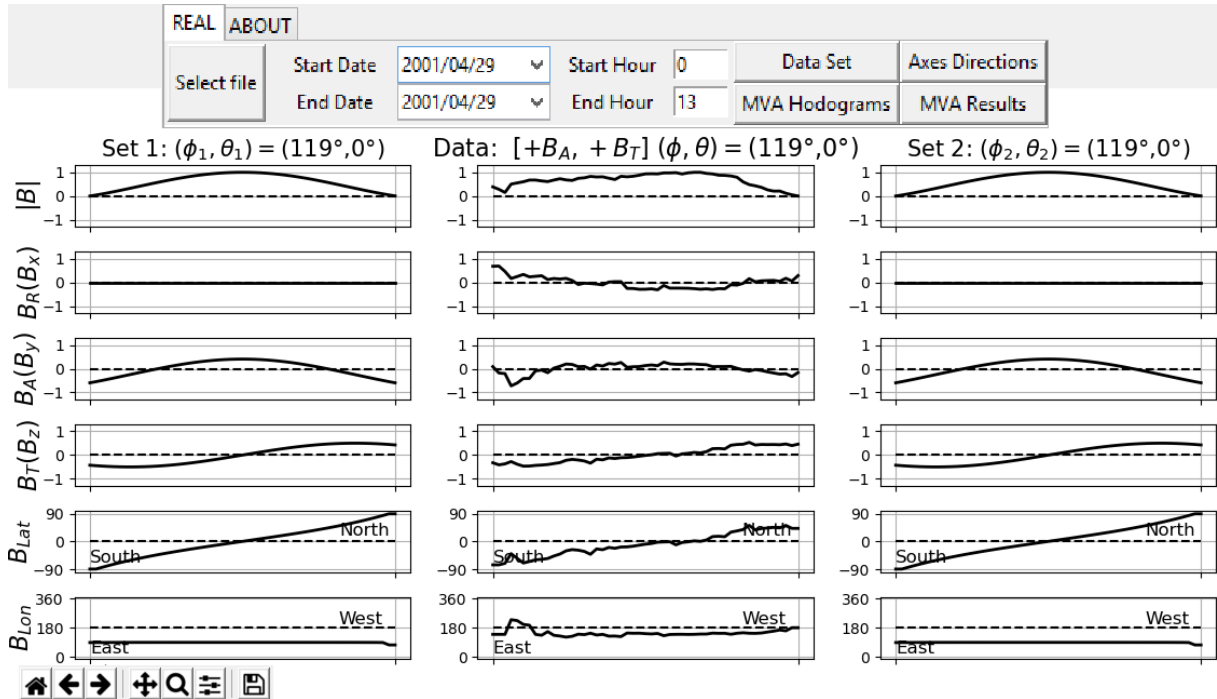
Tabela 12 – Tabela de resultados do MVA para o evento do período das 00 em 29 de abril de 2001 às 13 do mesmo dia.

Saída MVA	Validação MVA	Resultados
$(\phi, \theta) = (119^\circ, 0^\circ)$		
$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (27.1, 12.1, 1.9)$	$\frac{\lambda_2}{\lambda_3} = 6.283$ MVA consistente	Set 1: $(\phi_1, \theta_1) = (119^\circ, 0^\circ)$
$\vec{x}_1(GSE) = (-0.07, -0.04, 0.99)$	$P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = 9.774$ MVA consistente	Set 2: $(\phi_2, \theta_2) = (119^\circ, 0^\circ)$
$\vec{x}_2(GSE) = (-0.49, 0.87, 0.0)$	$\chi = 126.64^\circ$ grande rotação angular	Tipo e Mão: SEN e L
$\vec{x}_3(GSE) = (-0.86, -0.48, -0.08)$		

FONTE: do Autor.

Apesar da sequência de processamento sugerida nesta seção, cada etapa do experimento é independente e pode ser realizada (ou repetida) em qualquer ordem. Somente quando clica-se no botão “Save decision”, essa decisão é considerada nas outras telas.

Figura 24 – Janela do programa ao selecionar ao botão Axes Direction para o período das 00 em 29 de abril de 2001 às 13 do mesmo dia. Neste caso, o experimento completo é processado e são observados seis gráficos no ambiente de visualização. Cada linha contém a magnitude do campo magnético ($|B|$), suas componentes GSE (B_x , B_y , B_z) e suas componentes geográficas (B_{lat} , B_{lon}). As colunas à esquerda e à direita correspondem aos conjuntos ideais e a central corresponde ao resultado do MVA (identificados pelas expressões *Set 1*, *Set 2* e *MVA*, respectivamente, no título dos gráficos).



FONTE: do Autor.

Para redefinir uma decisão registrada, basta alterar os parâmetros de entrada do evento e reprocessar.

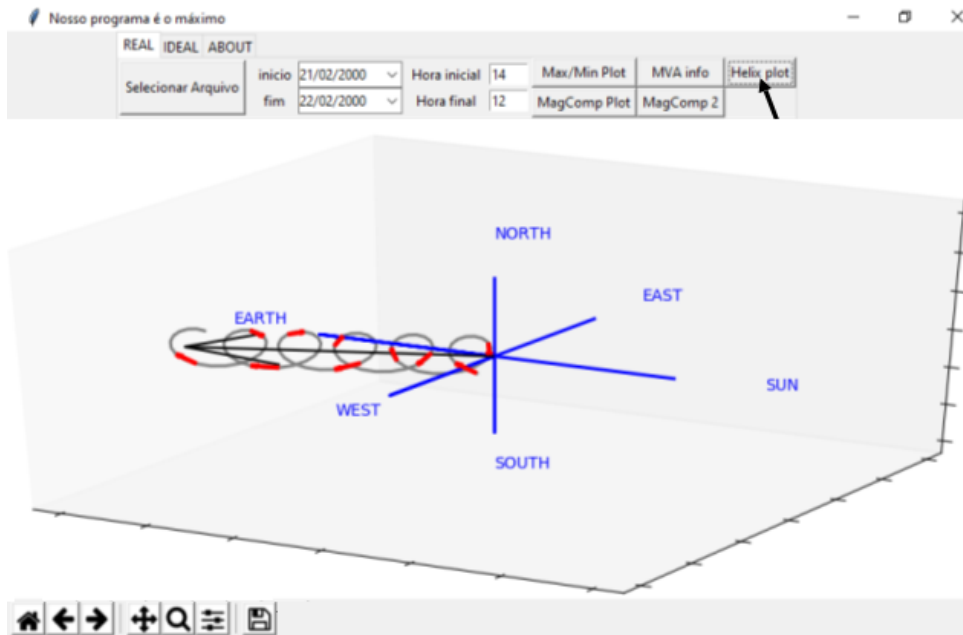
4.2.1 Módulo de visualização 3D

Durante essa pesquisa foi iniciado o desenvolvimento de uma ferramenta de visualização do modelo livre-de-força e sua rotação em 3D. A conclusão desse módulo será deixada para trabalhos futuros. Espera-se construir uma tela interativa de visualização permitindo, por exemplo, rotacionar a visualização do gráfico 3D para cada evento analisado. A Figura 25 apresenta um resultado com a visualização da hélice idealizada em uma versão anterior do aplicativo.

4.3 Análise dos ângulos do eixo da nuvem obtidos no MVA

No estudo sobre os tipos de tubo de fluxo, nos deparamos com situações incoerentes entre o tipo e os ângulos do eixo do tubo. Uma primeira análise foi feita usando a Tabela 2 do trabalho de [Huttunen et al. \(2005\)](#), resumida na Tabela 13.

Figura 25 – Visualização de hélice idealizada em uma versão antiga da interface amigável desenvolvida.



FONTE: do Autor.

Para os tubos tipo ENW e WNE é esperado que o ângulo latitudinal, θ , seja positivo, pois trata-se de tubos unipolares ocorrendo ao norte nos sentidos Leste-Oeste (E-W) e Oeste-Leste (W-E). A mesma análise é feita para os tubos ESW e WSE, onde espera-se que o ângulo latitudinal, θ seja negativo. Para os tubos bipolares, o estudo é feito com relação ao ângulo longitudinal, ϕ . Nesses casos, os tubos ocorrem no sentido norte-sul(N-S) ou sul-norte(S-N) ocorrendo nos octantes leste(E) ou oeste(W). Quando ocorrem nos octantes leste, espera-se que ϕ , seja menor que 180° . Nessa situação, temos os tipos NES e SEN. Conseqüentemente, para os tubos ocorrendo nos octantes oeste, esperamos que o ângulo ϕ seja maior que 180° . Nessa situação, temos os tubos NWS e SWN.

Dessa forma, de acordo com a Tabela 13, vemos incoerências com relação aos ângulos ϕ e θ obtidos pelo MVA. Essas divergências serviram de motivação para este trabalho, cujo objetivo é sanar tais incongruências.

4.3.1 Estudo de caso: Tubo WNE

Nesta seção é apresentado um estudo detalhado do evento catalogado na Tabela 2 em Huttunen *et al.* (2005), das 14 h de 21 de fevereiro de 2000 às 12 h de 22 de fevereiro de 2000. Os ângulos longitudinais e latitudinais são, respectivamente, $\phi = 122^\circ$ e $\theta = -72^\circ$ e o tipo de tubo de fluxo é classificado como WNE. De acordo com os ângulos, trata-se de uma nuvem cujo o tubo é unipolar $|\theta| > 45^\circ$, com polaridade sul (S). No entanto, sua classificação WNE refere-se a um tubo unipolar na polaridade norte (N).

Tabela 13 – Motivação para correção dos ângulos do eixo da nuvem magnética obtidos pelo MVA catalogados segundo [Huttunen et al. \(2005\)](#). As colunas apresentam, nesta ordem, o tipo de tubo, início e o fim dos eventos, ângulos (ϕ, θ) e o problema relacionado com o tipo de nuvem.

Tipo	MC início (D/M/A H)	MC fim (D/M/A H)	Huttunen (ϕ, θ)	Problema
ENW	22/09/1997 1	22/09/1997 18	(19°, -64°)	$\theta < 0$
ESW	26/05/1997 16	27/05/1997 19	(51°, 62°)	$\theta > 0$
	04/03/2001 16	05/03/2001 1	(15°, 75°)	$\theta > 0$
	28/02/2002 18	01/03/2002 10	(93°, 9°)	$\theta > 0$
WNE	18/09/1997 3	19/09/1997 21	(24°, -50°)	$\theta < 0$
	21/02/2000 14	22/02/1997 12	(122°, -72°)	$\theta < 0$
WSE	21/04/2001 23	22/04/2001 24	(89°, 61°)	$\theta > 0$
NWS	16/05/1997 7	16/05/1997 16	(109°, 40°)	$\phi < 180$
	18/02/1999 14	19/02/1999 11	(96°, 6°)	$\phi < 180$
	28/07/2000 18	29/07/2000 10	(122°, 9°)	$\phi < 180$
	02/08/2002 6	2/08/2002 22	(104°, 25°)	$\phi < 180$
SWN	10/01/1997 5	11/01/1997 21	(69°, 14°)	$\phi < 180$
	09/06/1997 6	09/06/1997 23	(73°, 12°)	$\phi < 180$
	19/06/1997 6	19/06/1997 16	(43°, 38°)	$\phi < 180$
	10/10/1997 23	12/10/1997 1	(82°, 3°)	$\phi < 180$
	07/11/1997 5	08/11/1997 3	(48°, 6°)	$\phi < 180$
	04/02/1998 5	05/02/1998 14	(31°, -10°)	$\phi < 180$
	14/06/1998 2	14/06/1998 24	(83°, 14°)	$\phi < 180$
	20/08/1998 8	21/08/1998 18	(113°, -16°)	$\phi < 180$
	10/07/2001 17	11/07/2001 23	(72°, 3°)	$\phi < 180$
	24/03/2002 10	25/03/2002 12	(106°, 9°)	$\phi < 180$

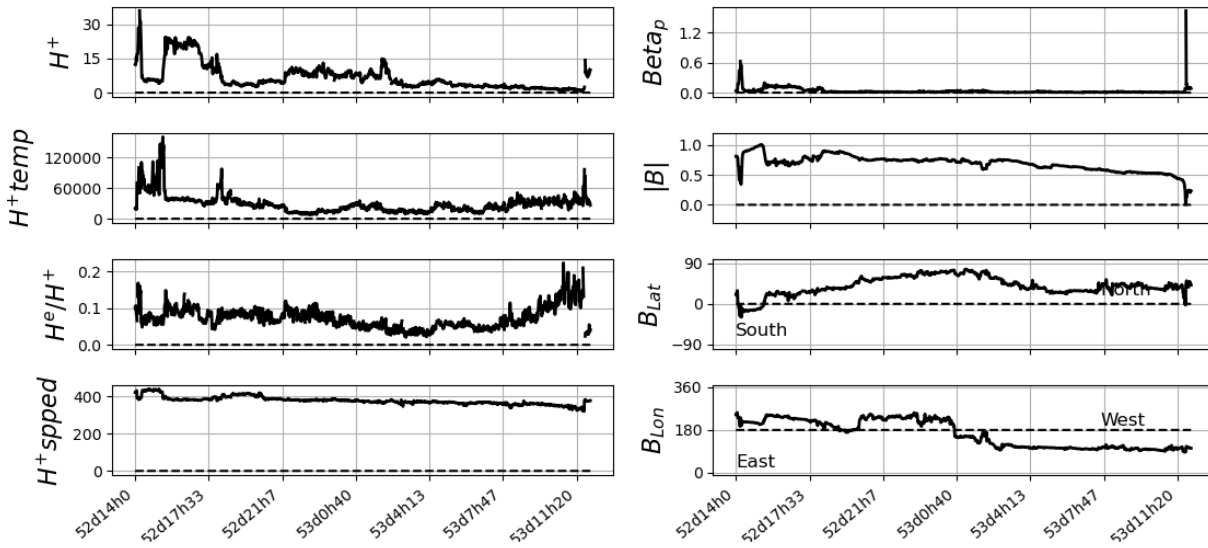
FONTE: do Autor.

Motivados por essa inconsistência, analisamos um conjunto de componentes do evento. A primeira análise é sobre os limites do evento. Para tanto, utilizamos a ferramenta *Data Set* e inspecionamos visualmente os dados do satélite. Observa-se que o componente β de plasma apresenta dois picos durante o evento, um no início e outro no final do período, como mostra a Figura 26. Por esse motivo, adicionamos uma hora à borda inicial e retiramos uma hora na borda final. Assim, o intervalo de tempo deste evento foi das 15 h de 21 de fevereiro de 2000 às 11 h de 22 de fevereiro de 2000. A nova situação é apresentada na Figura 27.

A Figura 27 mostra que não houve gaps em todo o período. O componente β do plasma é menor que 0,3. O campo magnético mostra uma rotação suave e um comportamento clássico referente a uma nuvem magnética. O componente B_{lat} é predominante ao norte (N) ao longo do período, comportamento típico de nuvens unipolares. O componente B_{lon} apresenta um comportamento oeste (W) - leste (E). Assim, por inspeção visual, é esperado um tubo de fluxo do tipo WNE.

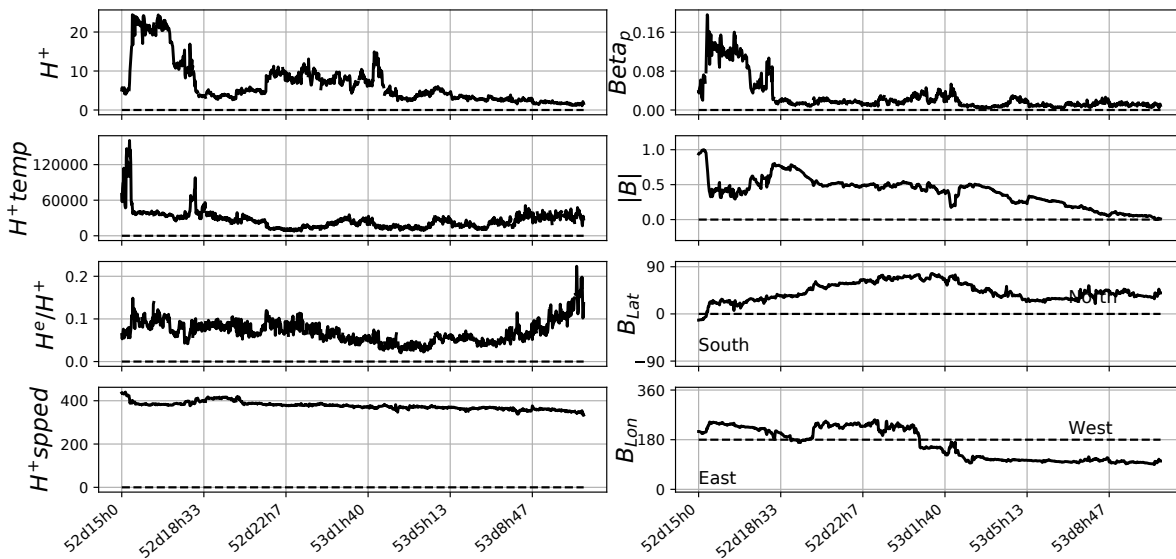
A Figura 28 apresenta o quadro obtido pelo botão Direção dos eixos (*Axis direc-*

Figura 26 – Quadro *Data Set* da nuvem catalogada no período: 14 h de 21 de fevereiro de 2000 às 12 h de 22 de fevereiro de 2000.



FONTE: do Autor.

Figura 27 – Quadro *Data Set* da nuvem catalogada no período: 15 h de 21 de fevereiro de 2000 às 11 h de 22 de fevereiro de 2000.

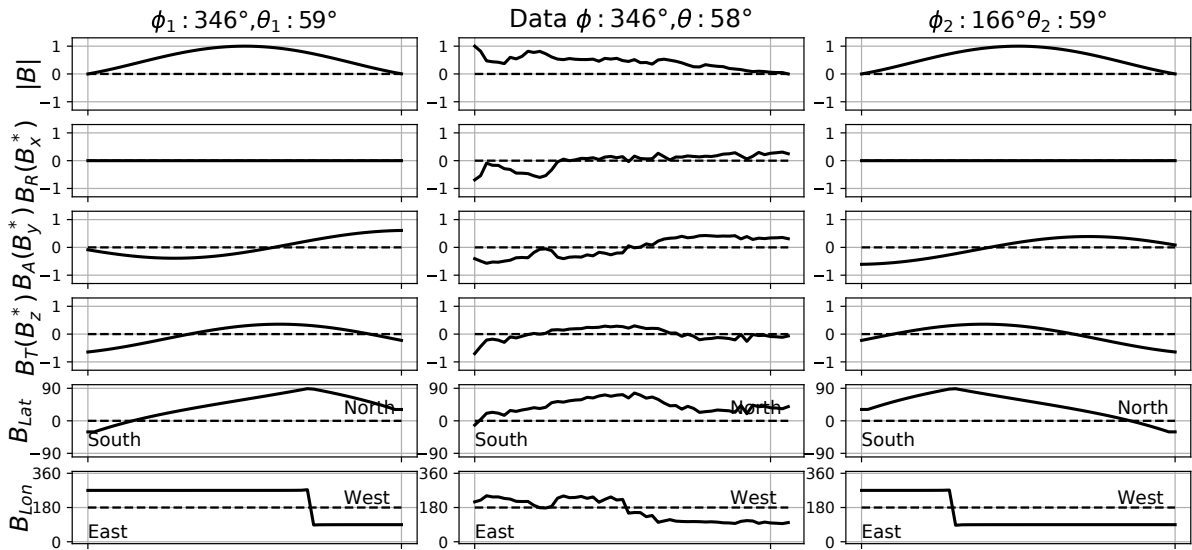


FONTE: do Autor.

tion). Por inspeção visual, observa-se o *matching* com o cenário 2. A Figura 29 apresenta o quadro obtido pelo botão *MVA Hodograms*. O objetivo é encontrar a hipótese ideal que melhor se ajusta ao caso real. Nesta situação, não foi necessário alterar o sinal dos componentes B_A , B_T ou $B_A \times B_T$ e o cenário escolhido é o da direita (Conjunto 2).

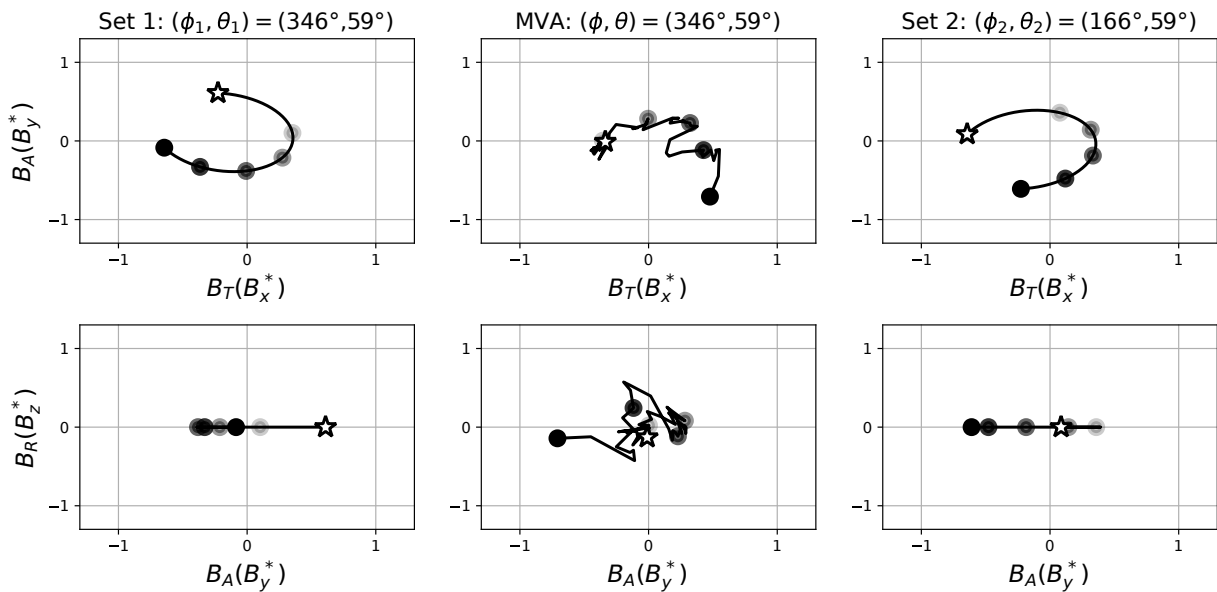
A análise visual é então quantificada usando o botão *MVA Results* e é visualizada na Tabela 14. A escolha visual foi para o cenário 2. Assim, de acordo com a coluna dos resultados automáticos, temos que os ângulos do eixo do tubo são $(\phi, \theta) = (166^\circ, 59^\circ)$ e sua classificação é WNE.

Figura 28 – Quadro *Axes Directions* da nuvem catalogada no período: 15 h: de 21 de fevereiro de 2000 às 11 h de 22 de fevereiro de 2000.



FONTE: do Autor.

Figura 29 – Quadro *MVA Hodogram* da nuvem catalogada no período: 15 h: de 21 de fevereiro de 2000 às 11 h de 22 de fevereiro de 2000.



FONTE: do Autor.

4.3.2 Estudo de caso: Tubo WSE

Nesta seção apresenta-se o estudo de uma nuvem, considerada complexa, registrada no período de 19 à 22 de março de 2001. Na literatura, encontra-se duas análises distintas do mesmo evento. Os autores [Lepping, Burlaga e Jones \(1990\)](#), [Nieves-Chincilla, Hidalgo e Sequeiros \(2005\)](#), [Lugaz e Farrugia \(2014\)](#), [González *et al.* \(2017a\)](#) consideram o evento sendo composto por duas nuvens magnéticas distintas, enquanto [Huttunen *et al.* \(2005\)](#), [Lynch *et al.* \(2003\)](#), [Marubashi e Lepping \(2007\)](#), [Korth *et al.* \(2008\)](#), [Richardson e Zhang](#)

Tabela 14 – Quadro *MVA Results* da nuvem catalogada no período: 15 h: de 21 de fevereiro de 2000 às 11 h de 22 de fevereiro de 2000.

Saída MVA	Validação MVA	Resultados
$(\phi, \theta) = (346.0^\circ, 59.0^\circ)$		
$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (82.1, 15.7, 5.4)$	$\frac{\lambda_2}{\lambda_3} = 2.8$ MVA consistent	Set 1: $(\phi_1, \theta_1) = (346^\circ, 59^\circ)$
$\vec{x}_1(GSE) = (-0.28, -0.95, 0.03)$	$P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = 7.5$ MVA consistent	Set 2: $(\phi_2, \theta_2) = (166^\circ, 59^\circ)$
$\vec{x}_2(GSE) = (0.50, -0.122, 0.85)$	$\chi = 110.33^\circ$ large angular rotation	Type and Hand: WNE and R
$\vec{x}_3(GSE) = (-0.81, 0.25, 0.52)$		

FONTE: do Autor.

(2008), Richardson e Cane (2010) descrevem todo o período como uma única nuvem. A Tabela 15 apresenta o evento sob a análise dos autores citados.

Tabela 15 – Sumário da análise do evento ocorrido no período de 19-22 de Março de 2001. Quatro estudos indicaram a presença de duas nuvens magnéticas, enquanto seis identificaram apenas uma nuvem no período.

Lista MCs	MC1			MC2			Fim	UT	Fonte
	Início	UT	Fim	UT	Início	UT			
Ref. ¹	19	23:18	20	18:18	20	17:48	22	14:48	Wind
Ref. ²	19	21	20	13	20	18	21	23	ACE
Ref. ³	19	20	20	14	20	19	22	00	Wind
Ref. ⁴	19	22	-	-	-	-	21	23	ACE
Ref. ⁵	19	19	-	-	-	-	21	17	ACE
Ref. ⁶	19	21	-	-	-	-	22	06	Wind
Ref. ⁷	20	≈ 01	-	-	-	-	21	22	Wind
Ref. ⁸	19	17	-	-	-	-	21	12	ACE
Ref. ⁹	19	17	-	-	-	-	21	22	ACE
Ref. ¹⁰	19	21	20	13	20	18	21	23	ACE

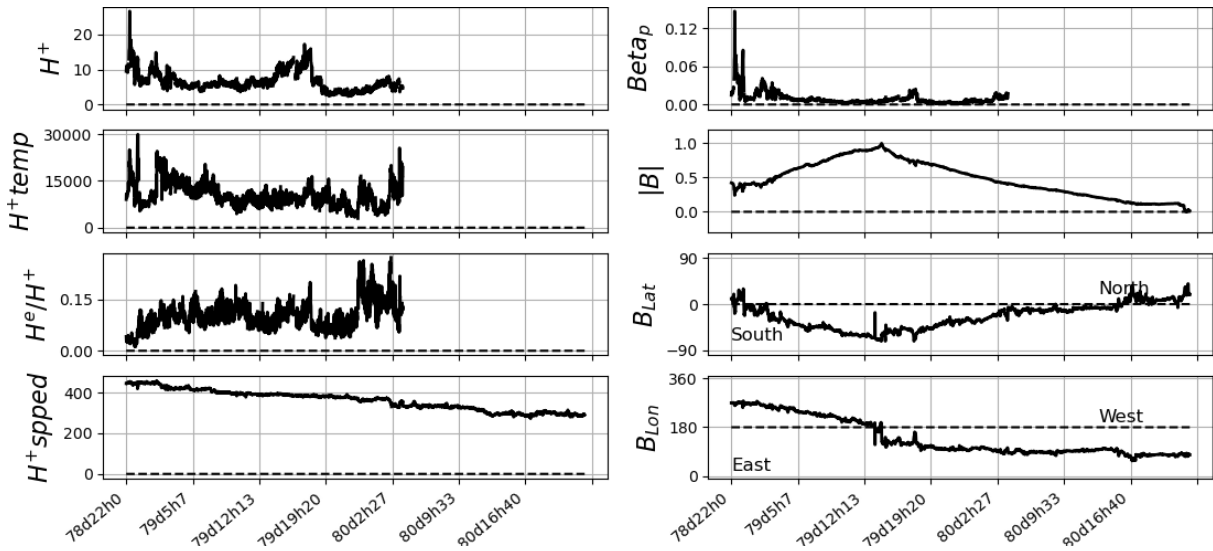
FONTE: Adaptado de González *et al.* (2017a).

- ¹ Lepping, Burlaga e Jones (1990)
- ² Nieves-Chincilla, Hidalgo e Sequeiros (2005)
- ³ Lugaz e Farrugia (2014)
- ⁴ Huttunen *et al.* (2005)
- ⁵ Lynch *et al.* (2003)
- ⁶ Marubashi e Lepping (2007)
- ⁷ Korth *et al.* (2008)
- ⁸ Richardson e Zhang (2008)
- ⁹ Richardson e Cane (2010)
- ¹⁰ González *et al.* (2017a)

Nessa pesquisa, considera-se a interpretação deste evento segundo Huttunen *et al.* (2005). Ou seja, uma única nuvem, de tipo WSE com $(\phi, \theta) = (133^\circ, -57^\circ)$. Trata-

se portanto de uma nuvem unipolar, ocorrendo num octante Sul, com ângulo $\theta < 0$. A Figura 30 apresenta os gráficos dos dados do satélite, obtidos pelo botão conjunto de dados (*DataSet*).

Figura 30 – Quadro conjunto de dados (*Data Set*) da MC catalogada no período: 22 h de 19 de março de 2001 às 23 h de 21 de março de 2001.



FONTE: do Autor.

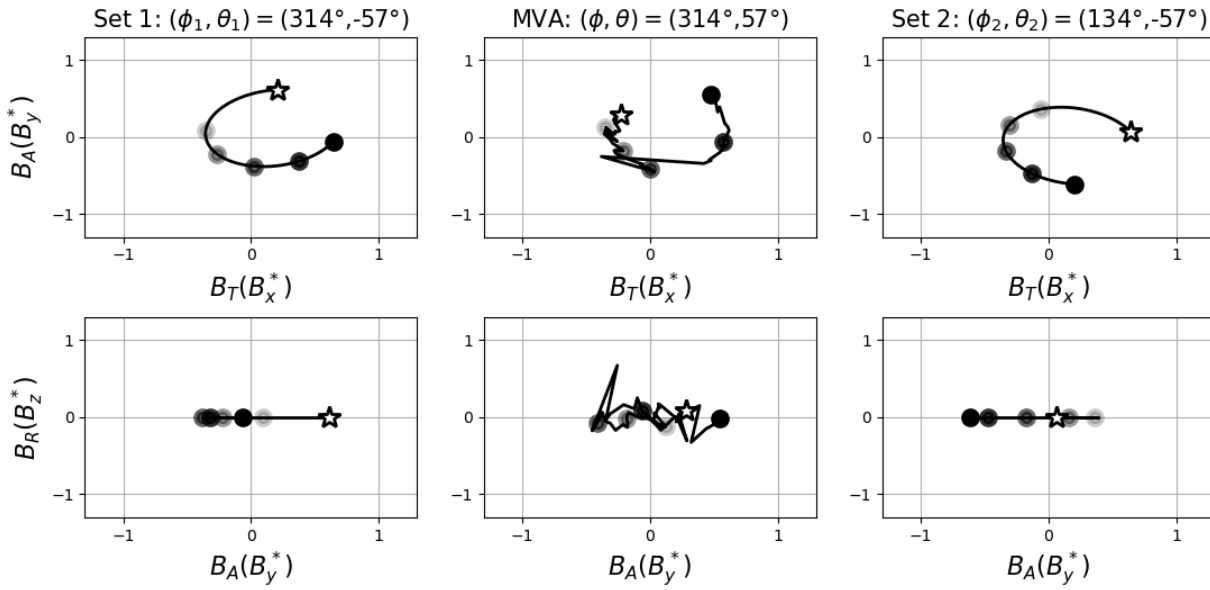
Fazendo a análise do evento, a partir da Figura 30, constata-se que o componente β do plasma é menor que 0,3. O campo magnético mostra uma rotação suave e um comportamento clássico referente a uma nuvem magnética. A componente B_{lat} é predominante ao sul (S) ao longo do período, comportamento típico de nuvens unipolares. O componente B_{lon} apresenta um comportamento oeste (W) - leste (E). Assim, por inspeção visual, é esperado um tubo de fluxo do tipo WSE.

A Figura 31 apresenta o quadro obtido pelo botão *MVA Hodograms*. O objetivo é encontrar a hipótese ideal que melhor se ajusta ao caso real. Nesta situação, observe que é necessário alterar o sinal das componentes $B_A \times B_T$ para o *matching* entre os cenários ideal e real. A Figura 32 apresenta este novo cenário. Observe que o *matching* ocorre com o cenário 2 e que os ângulos do MVA e do modelo são congruentes.

A Figura 33 apresenta o quadro obtido pelo botão Direção dos eixos (*Axis direction*) após alterar o sinal das componentes $B_A \times B_T$. Por inspeção visual, observa-se o *matching* com o cenário 2.

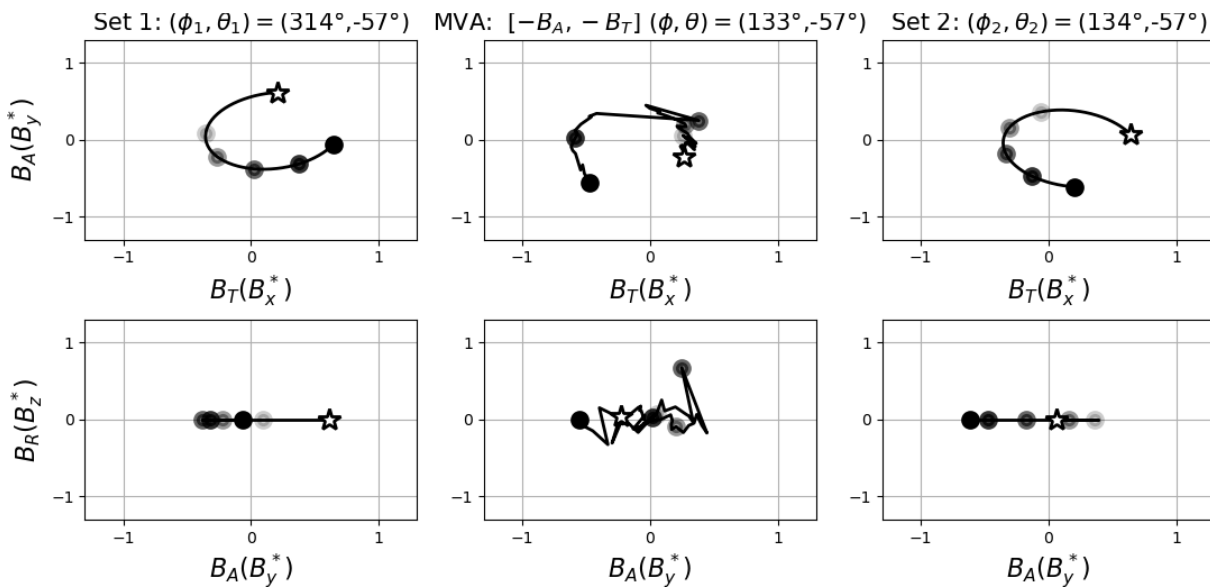
A análise visual é então quantificada usando o botão Resultados de MVA (*MVA Results*) e é visualizada na Tabela 16. A escolha visual se deu para o cenário 2. Assim, de acordo com a coluna dos resultados, tem-se que os ângulos do eixo do tubo são $(\phi, \theta) = (134^\circ, -57^\circ)$ e sua classificação é WSE.

Figura 31 – Quadro *MVA Hodogram* da nuvem catalogada no período: 22 h de 19 de março de 2001 às 23 h de 21 de março de 2001.



FONTE: do Autor.

Figura 32 – Quadro *MVA Hodogram* da nuvem catalogada no período: 22 h de 19 de março de 2001 às 23 h de 21 de março de 2001.

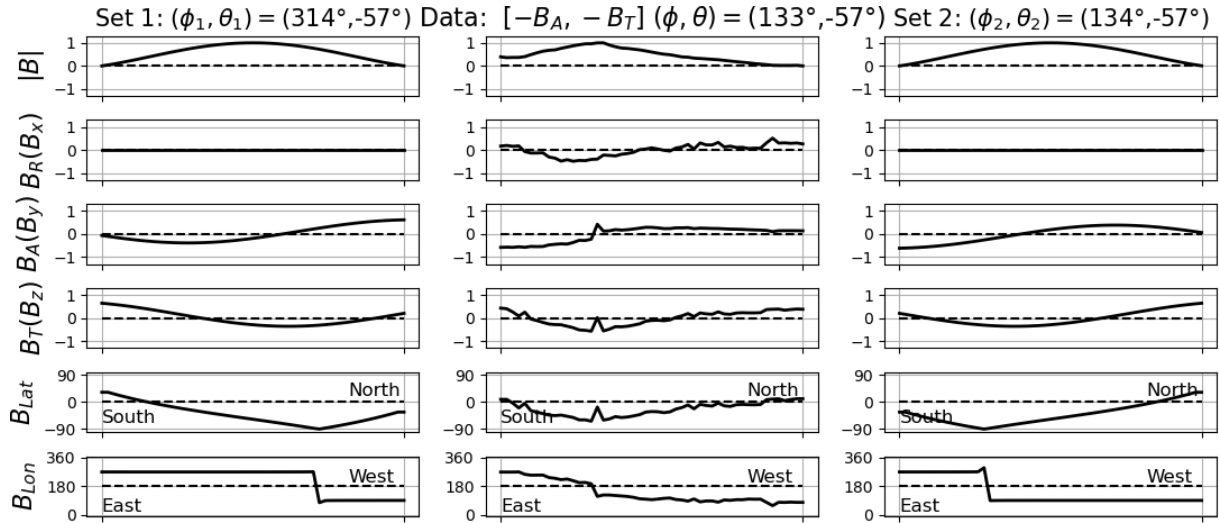


FONTE: do Autor.

4.3.3 Estudo de caso: Tubo SWN

Nesta seção é apresentado um estudo detalhado do evento catalogado na Tabela 2 em [Huttunen et al. \(2005\)](#), das 18 h de 28 de fevereiro de 2002 às 10 h de 01 de março de 2002. Os ângulos longitudinais e latitudinais são, respectivamente, $\phi = 93^\circ$ e $\theta = 9^\circ$ e o tubo de fluxo é classificado como ESW. De acordo com os ângulos, trata-se de uma nuvem cujo o tubo é bipolar $\theta < 45^\circ$. No entanto, sua classificação ESW, refere-se a um

Figura 33 – Quadro Direção dos eixos (*Axis direction*) da MC catalogada no período: 22 h de 19 de março de 2001 às 23 h de 21 de março de 2001.



FONTE: do Autor.

Tabela 16 – Quadro Resultados de MVA (*MVA Results*) da MC catalogada no período: 22 h de 19 de março de 2001 às 23 h de 21 de março de 2001.

Saída MVA $[-B_A, -B_T]$	Validação MVA	Resultados
$(\phi, \theta) = (133.74^\circ, -57.46^\circ)$		
$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (112.5, 49.2, 1.3)$	$\frac{\lambda_2}{\lambda_3} = 36.886.8$ MVA consistent	Set 1: $(\phi_1, \theta_1) = (314^\circ, -57^\circ)$
$\vec{x}_1(GSE) = (-0.25, -0.91, -0.31)$	$P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = 16.665$ MVA consistent	Set 2: $(\phi_2, \theta_2) = (134^\circ, -57^\circ)$
$\vec{x}_2(GSE) = (-0.37, 0.38, -0.84)$	$\chi = 147.81^\circ$ large angular rotation	Type and Hand: WSE and L
$\vec{x}_3(GSE) = (-0.893, -0.097, -0.439)$		

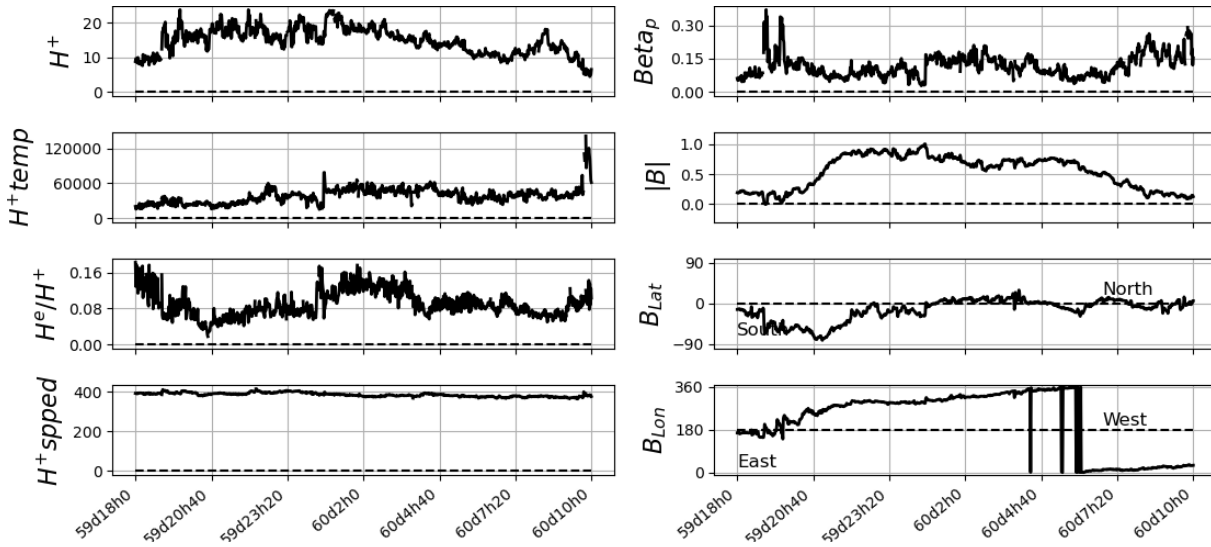
FONTE: do Autor.

tubo unipolar na polaridade norte (N).

Motivados por esta inconsistência, passamos à análise do conjunto de componentes do evento. Ao usar o botão conjunto de dados (*Data Set*), é possível observar que o módulo do campo magnético flutua no início do evento como mostra a Figura 34. Por esta razão, esta borda foi alterada por duas horas. A nova configuração do evento pode ser vista na Figura 35.

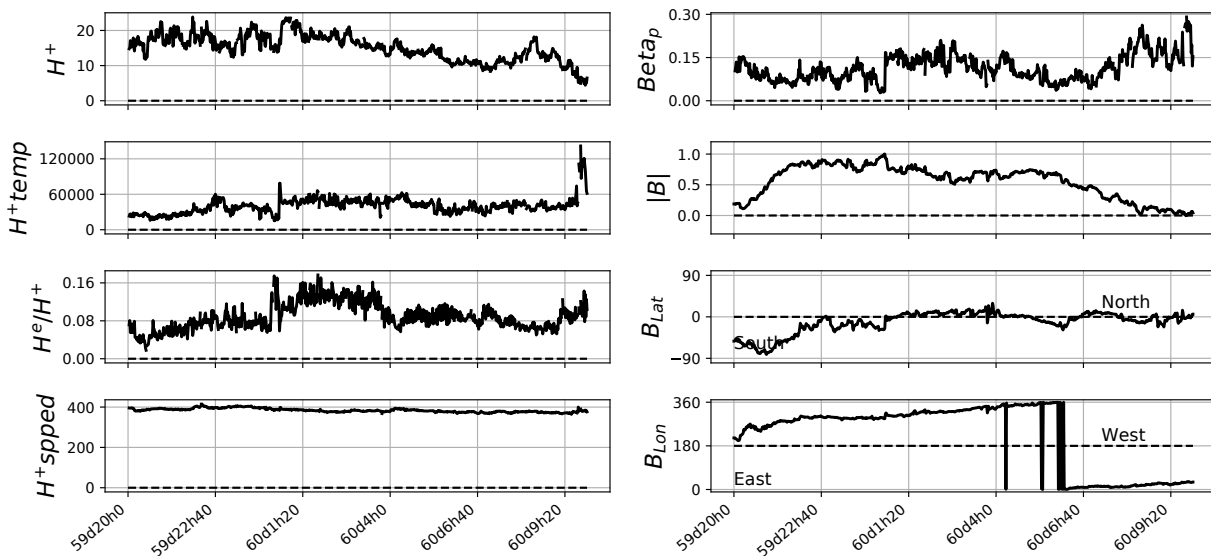
A Figura 35 mostra que este período não apresentou gaps. A componente β de plasma é menor que 0,3. O campo magnético tem rotação suave e um comportamento clássico de MC. A componente B_{lat} evolui com o passar do tempo desde o Sul (S) e cruza o eixo (0°) aproximadamente no meio do evento tornando-se Norte (N). O sinal então continua a oscilar entre as polaridades norte e sul, em torno do valor zero. Este é

Figura 34 – Quadro conjunto de dados (*Data Set*) da MC catalogada no período: 18 h de 28 de fevereiro de 2002 às 10h de 01 de março de 2002.



FONTE: do Autor.

Figura 35 – Quadro conjunto de dados (*Data Set*) da MC catalogada no período: 20 h de 20 de fevereiro de 2002 às 10h de 01 de março de 2002.



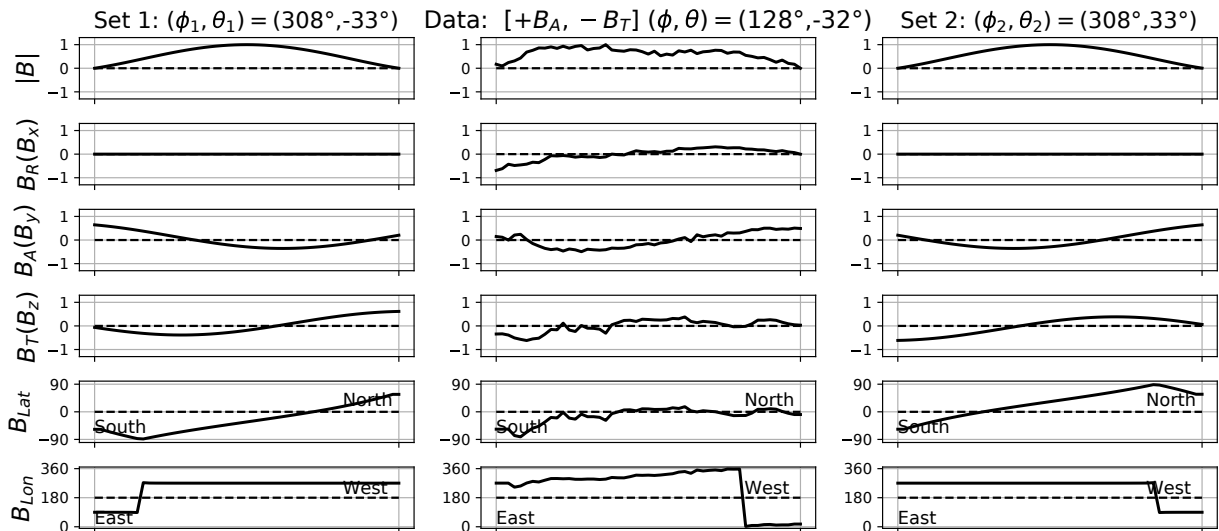
FONTE: do Autor.

um comportamento típico de nuvens bipolares. A componente B_{lon} começa no oeste (W) e quando atinge o ângulo de 360° cai abruptamente para o ângulo de 0° . É importante mencionar que os ângulos de 360° e 0° são algebricamente iguais, porém, quando colocados no gráfico, são apresentados nos extremos, o que pode resultar em uma classificação incorreta.

Portanto, para a correta classificação do tubo de fluxo é necessário analisar em conjunto os ângulos ϕ , θ obtidos do MVA e os componentes B_{lat} e B_{lon} calculados a partir dos dados do campo magnético.

Seguindo a análise, apresentamos a Figura 36 obtida pelo botão Direção dos eixos (*Axis Direction*). Chegamos à mesma dualidade de interpretação como na Figura 35. A interpretação visual leva à escolha do cenário da esquerda (Conjunto 1) pois a componente B_{lon} salta de 360° para 0° , (este salto não existe de fato, devido à congruência dos ângulos) e porque a componente B_{lat} do caso real melhor se aproxima do ideal neste cenário.

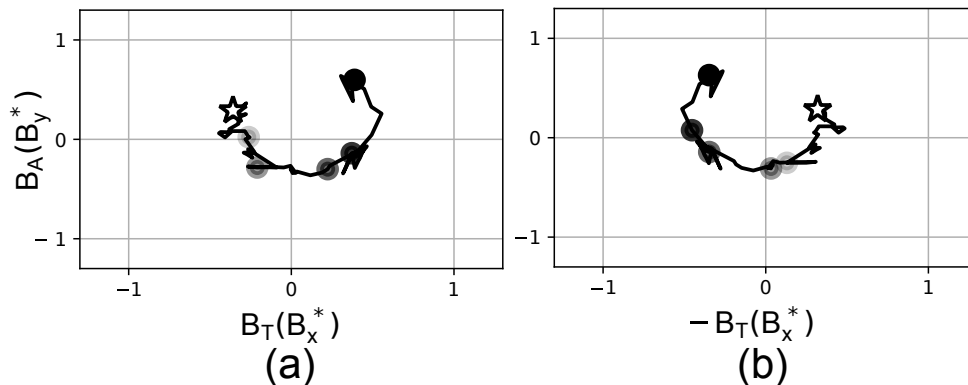
Figura 36 – Quadro direção dos eixos (*Axis Direction*) da MC catalogada no período: 20 h de 20 de fevereiro de 2002 às 10 h de 01 de março de 2002.



FONTE: do Autor.

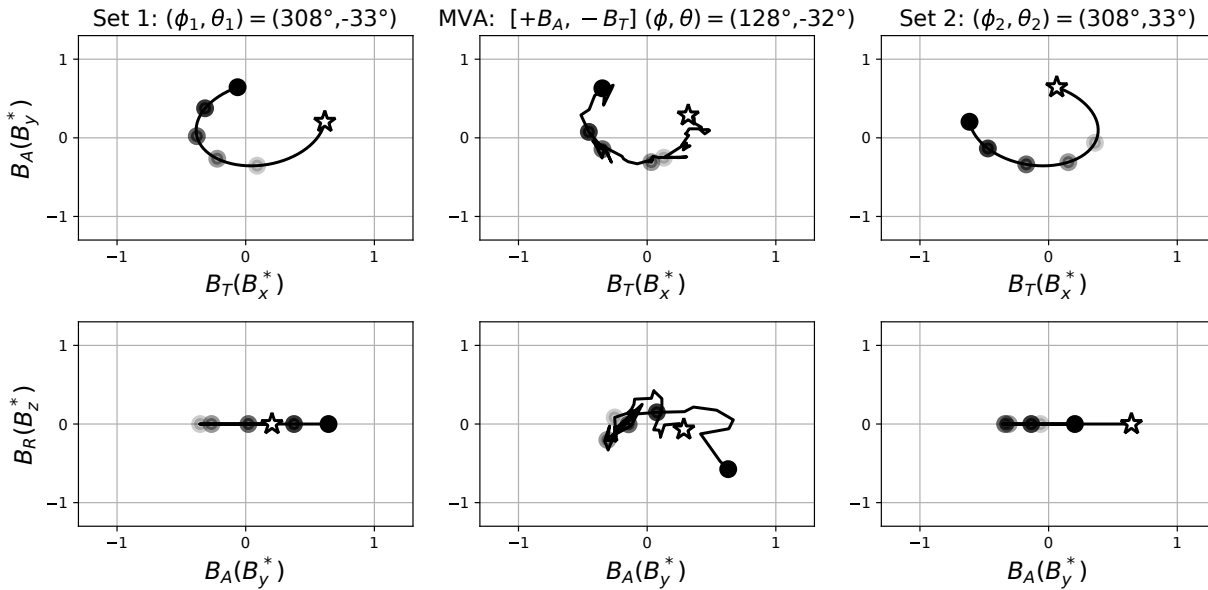
A Figura 37 apresenta a comparação entre o plano máximo $B_T \times B_A$ (a) e sua rotação $-B_T \times B_A$ (b). Aqui é possível perceber o que ocorre quando apenas a orientação do eixo horizontal é alterada. A Figura 37 (a) não faria o *matching* com nenhuma das opções de modelo apresentadas na Figura 38. No entanto, a correspondência é facilmente identificada quando o sinal da componente B_T é alterada, conforme Figura 38 usando o plano máximo na Figura 37 (b). Com isso, o quadro escolhido é o da esquerda (Conjunto 1).

Figura 37 – Comparação entre o plano de máxima variância padrão $B_T \times B_A$ (a) e sua rotação $-B_T \times B_A$ (b) da MC catalogada no período: 20 h de 20 de fevereiro de 2002 às 10h de 01 de março de 2002.



FONTE: do Autor.

Figura 38 – MVA Hodogram modificado por -BT da MC catalogada no período: 20 h de 20 de fevereiro de 2002 às 10h de 01 de março de 2002.



FONTE: do Autor.

Tabela 17 – Quadro Resultados do MVA (*MVA Results*) da MC catalogada no período: 20 h de 20 de fevereiro de 2002 às 10h de 01 de março de 2002.

Saída MVA	Validação MVA	Resultados
$(\phi, \theta) = (128.2^\circ, -32.6^\circ)$		
$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (50.1, 29.3, 4.5)$	$\frac{\lambda_2}{\lambda_3} = 6.4$ MVA consistent	Set 1: $(\phi_1, \theta_1) = (308^\circ, -33^\circ)$
$\vec{x}_1(GSE) = (-0.48, -0.74, -0.44)$	$P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = 7.6$ MVA consistent	Set 2: $(\phi_2, \theta_2) = (308^\circ, 33^\circ)$
$\vec{x}_2(GSE) = (-0.52, 0.66, -0.53)$	$\chi = 126.64^\circ$ large angular rotation	Type and Hand: SWN and R
$\vec{x}_3(GSE) = (-0.70, 0.03, 0.71)$		

FONTE: do Autor.

A análise visual é então quantificada usando o botão Resultados do MVA (*MVA Results*), e é mostrada na Tabela 17. A escolha visual é dada pelo conjunto 1. Assim, de acordo com a coluna dos resultados, tem-se que os ângulos do eixo do tubo de fluxo são $(\phi, \theta) = (308^\circ, -33^\circ)$ e o tipo é SWN.

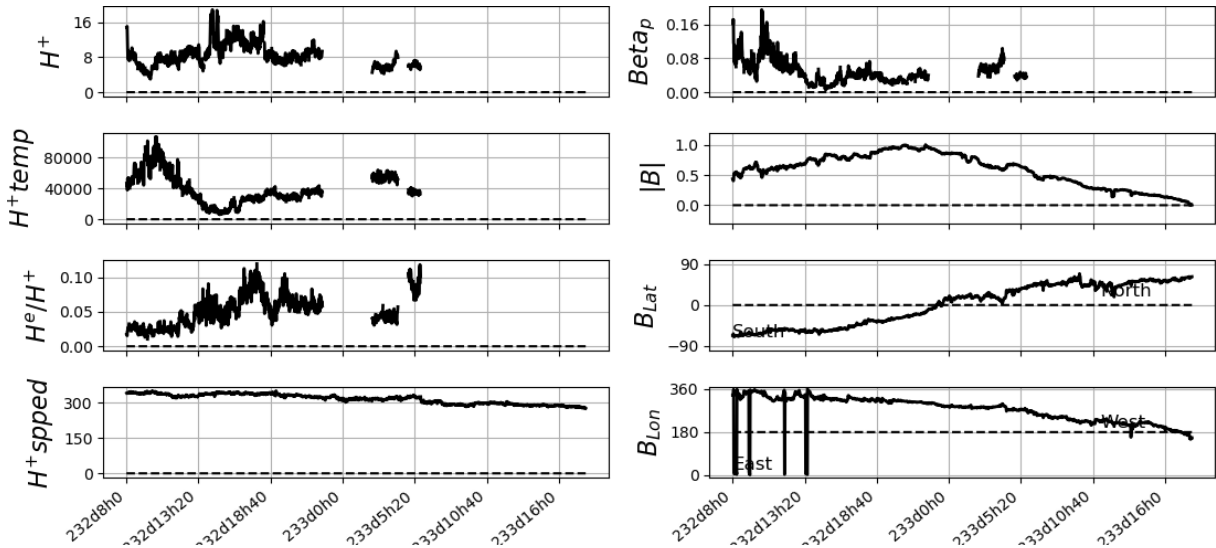
4.3.4 Estudo de caso: Tubo SWN

Nesta seção apresenta-se o estudo de uma MC também considerada complexa, registrada no período de 20 a 21 de agosto de 1998 (GONZÁLEZ *et al.*, 2013). Neste trabalho, seguiremos a interpretação de Huttunen *et al.* (2005) no qual, cataloga o evento no período de 20/08/1998, às 8 h, até 21/08/1998, às 18 h, e consistindo de uma nuvem SWN com $(\phi, \theta) = (113^\circ, -16^\circ)$. Trata-se portanto de uma nuvem bipolar, ocorrendo num

octante Oeste, com ângulo $\phi < 180^\circ$, que é uma inconsistência.

Motivados por esta inconsistência, passamos à análise do conjunto de componentes do evento. Ao usar o botão conjunto de dados (*Data Set*), obtém-se a Figura 39.

Figura 39 – Quadro conjunto de dados (*Data Set*) da MC catalogada no período: 8 h de 20 de agosto de 1998 às 18 h de 21 de agosto de 1998.



FONTE: do Autor.

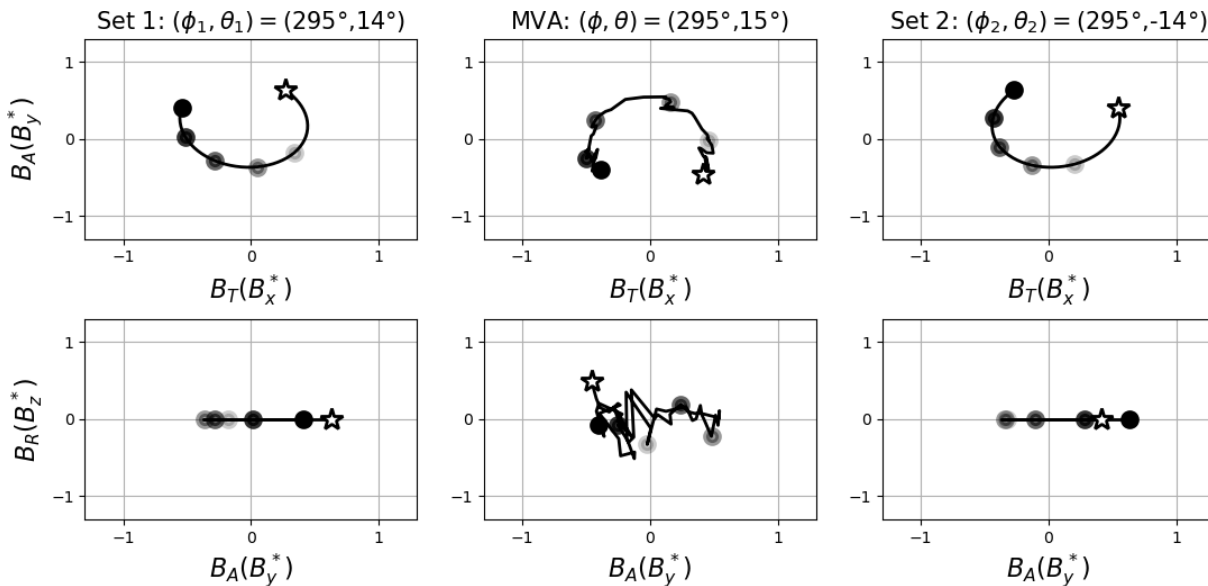
A Figura 39 mostra que este período apresentou gaps. A componente β de plasma é menor que 0,3. O campo magnético tem rotação suave e um comportamento clássico de MC. A componente B_{lat} evolui com o passar do tempo desde o Sul (S) e cruza o eixo (0°) aproximadamente no meio do evento tornando-se Norte (N). Este é um comportamento típico de nuvens bipolares. A componente B_{lon} é predominante no octante oeste (W). Assim, por inspeção visual, a classificação do tubo de fluxo é SWN.

Seguindo a análise, apresentamos a Figura 40, obtida do botão *MVA Hodograms*. Observa-se que o plano de máxima variância não faria o *matching* com nenhuma das opções de modelo apresentadas na Figura 40. No entanto, a correspondência é facilmente identificada quando o sinal da componente B_A é alterada, conforme Figura 41. Com isso, o quadro escolhido é o da esquerda (Conjunto 1).

Passamos agora à interpretação da Figura 42 obtida pelo botão Direção dos Eixos (*Axis Directions*). Por inspeção visual a escolha se dá pelo cenário 1.

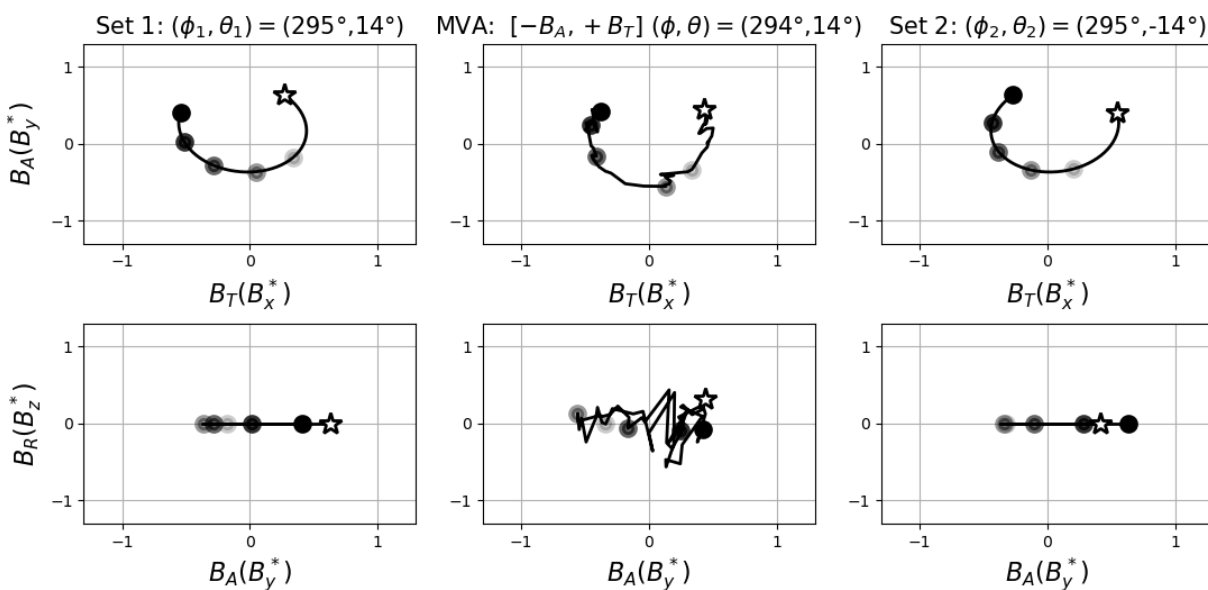
A análise visual é então quantificada usando o botão Resultados do MVA (*MVA Results*), e é mostrada na Tabela 18. A escolha visual é dada pelo conjunto 1. Assim, de acordo com a coluna dos resultados, tem-se que os ângulos do eixo do tubo de fluxo são $(\phi, \theta) = (295^\circ, 14^\circ)$ e o tipo é SWN.

Figura 40 – MVA Hodogram da MC catalogada no período: 8 h de 20 de agosto de 1998 às 18 h de 21 de agosto de 1998.



FONTE: do Autor.

Figura 41 – MVA Hodogram modificado por $-B_A$ da MC catalogada no período: 8 h de 20 de agosto de 1998 às 18 h de 21 de agosto de 1998.

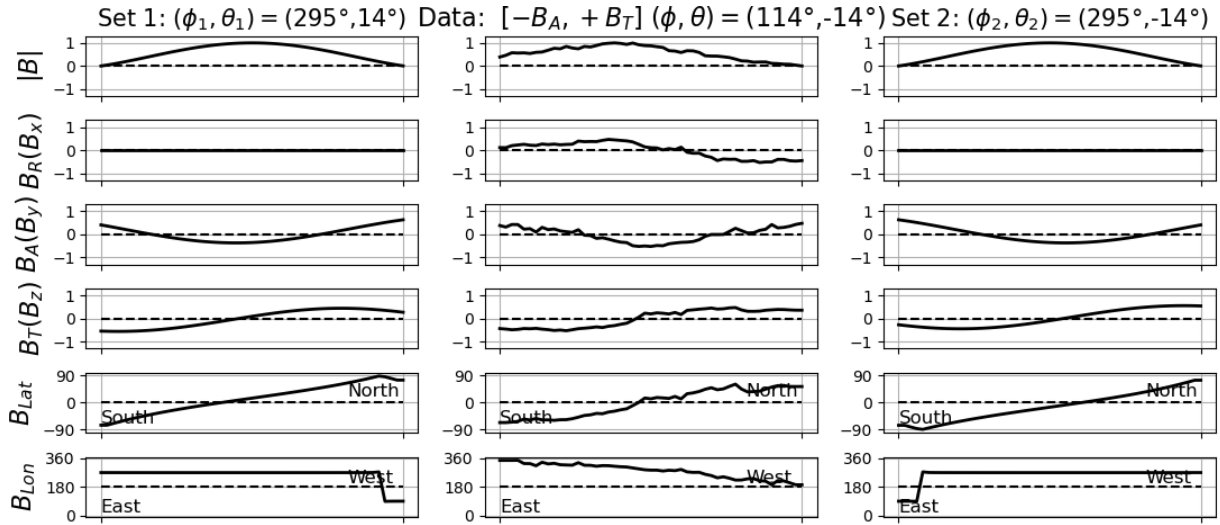


FONTE: do Autor.

4.3.5 Estatística do Experimento

Esta seção apresenta o estudo com os eventos catalogados na Tabela 2 em [Huttunen et al. \(2005\)](#). No entanto, o estudo se restringe aos eventos catalogados pelo satélite ACE que não apresentaram gaps maiores que 5 horas em suas componentes, totalizando 50 eventos (descritos no Apêndice B). Desses 50, 5 eventos (n. 20, 22, 29, 44 e 47 da Tabela 22) possuem MVA inconsistente. Assim, para a estatística de coerência da classificação de

Figura 42 – Quadro direção dos eixos (*Axis Direction*) da MC catalogada no período: 8 h de 20 de agosto de 1998 às 18 h de 21 de agosto de 1998.



FONTE: do Autor.

Tabela 18 – Quadro Resultados do MVA (*MVA Results*) da MC catalogada no período: 8 h de 20 de agosto de 1998 às 18 h de 21 de agosto de 1998.

Saída MVA	Validação MVA	Resultados
$(\phi, \theta) = (114.9^\circ, -14.7^\circ)$		
$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (100.7, 27.2, 1.1)$	$\frac{\lambda_2}{\lambda_3} = 23.3$ MVA consistent	Set 1: $(\phi_1, \theta_1) = (295^\circ, 14^\circ)$
$\vec{x}_1(GSE) = (-0.50, 0.01, 0.86)$	$P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = 17.6$ MVA consistent	Set 2: $(\phi_2, \theta_2) = (295^\circ, -14^\circ)$
$\vec{x}_2(GSE) = (-0.40, 0.87, -0.25)$	$\chi = 175.8^\circ$ large angular rotation	Type and Hand: SWN and R
$\vec{x}_3(GSE) = (0.76, 0.48, 0.43)$		

FONTE: do Autor.

tubos com a orientação do eixo da nuvem e *matching* entre os hodogramas são considerados 45 eventos consistentes. Aplicando a metodologia apresentada na Seção 3.2.1, obtemos os resultados presentes na Tabela 19.

A Tabela 19 contém as análises e correções das inconsistências destacadas na Tabela 13. Esta consiste de oito colunas, sendo: 1) identificação numérica; 2) e 3) início e fim do evento, a partir de [Huttunen et al. \(2005\)](#) com ajustes nas bordas; 4) ângulo do MVA; 5) função *Anglelist*, que consiste em duas inclinações possíveis para o eixo do tubo de fluxo; 6) escolha do sinal do autovalor obtido pelo MVA; 7) inclinação escolhida a partir da coluna 5; 8) tipo de tubo de fluxo e análise de coerência entre a inclinação do eixo do tubo de fluxo, obtida automaticamente pelo experimento.

Tabela 19 – Correção das inconsistências mostrada na Tabela 13 obtidas automaticamente pelo programa. As colunas apresentam nesta ordem: 1) Identificação 2) e 3) início e fim do evento; 4) ângulos (ϕ, θ) obtidos pelo MVA em graus; 5) ângulos obtidos pela função *Angellist*; 6) sinal dos autovetores; 7) conjunto de ângulos, e 8) correção da inconsistência relacionada ao tipo de tubo de fluxo.

Evento (*)	Início MC (D/M/Y, hora)	Fim MC (D/M/Y, hora)	Ângulo do MVA (ϕ, θ)	Ângulo automático $(\phi_1, \theta_1), (\phi_2, \theta_2)$	Sinal dos autovetores	Inclinação escolhida	Resultados
1.	18/09/2000, 00	18/09/2000, 14	(128, -62)	(308, 62), (128, 62)	[-BA, -BT]	(308, 62)	ENW e $\theta > 0$
2.	04/03/2001, 16	05/03/2001, 01	(332, 83)	(332, -83), (152, -83)	Undefined		WSE e $\theta < 0$
3.	28/02/2002, 20	01/03/2002, 10	(128, -33)	(308, -33), (308, 33)	[BA, -BT]	(308, -33)	SWN e $\theta > 0$
4.	20/11/2003, 11	21/11/2003, 00	(7, 75)	(7, -75), (186, -75)	Undefined		ESW e $\theta > 0$
5.	21/02/2000, 15	22/02/2000, 11	(346, 59)	(346, 59), (166, 59)	[BA, BT]	(166, 59)	WNE e $\theta > 0$
6.	22/04/2001, 00	23/04/2001, 00	(276, -59)	(96, -59), (276, -59)	Undefined	(96, -59)	WSE e $\theta < 0$
7.	18/02/1999, 14	19/02/1999, 10	(100, 3)	(280, -4), (280, 4)	[-BA, -BT]	(280, -4)	NWS e $\phi > 180$
8.	28/07/2000, 18	29/07/2000, 09	(129, -8)	(309, 8), (309, -8)	[-BA, BT]	(309, 8)	
9.	02/08/2002, 06	02/08/2002, 22	(100, 23)	(280, 23), (280, -23)	[BA, -BT]	(280, -23)	
10.	14/06/1998, 02	15/06/1998, 00	(74, 19)	(254, 19), (254, -19)	[BA, -BT]	(254, -19)	SWN e $\phi > 180$
11.	18/04/2002, 00	19/04/2002, 01	(175, 29)	(355, 29), (355, -29)	[BA, BT]	(355, -29)	
12.	18/08/2003, 06	19/08/2003, 11	(176, 29)	(356, -29), (356, 29)	[-BA, -BT]	(356, -29)	

*Huttunen *et al.* (2005)

FONTE: do Autor.

A partir da Tabela 19, observa-se que, depois de aplicar nossa metodologia, todos os casos estudados mostram consistência entre a inclinação dos eixos e o tipo de tubo de fluxo, que significa que este processo é 100% eficiente. Para os demais eventos presentes na Tabela 2 em Huttunen *et al.* (2005), esses resultados também foram alcançados. Em outras palavras, todos os 45 eventos estudados mostraram coerência entre a inclinação do eixo e a classificação do tubo de fluxo.

Constatou-se que 7 eventos (n. 10, 12, 13, 31, 32, 48 e 50 da Tabela 22) não satisfizeram o critério exigido para o *matching* entre os planos de máxima e mínima variância real e ideal. Sobre o evento 2 na Tabela 19, os indicadores numéricos $\frac{\lambda_2}{\lambda_3} = 1.56$, $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = 3.2$ e $\chi = 94.8^\circ$ indicam que o MVA é inconsistente e o programa classifica o tubo incorretamente. Portanto, seu uso não é recomendado para a caracterização de nuvens magnéticas, ou seja, este evento foi incoerente tanto para Huttunen *et al.* (2005) quanto nesta análise. Os demais eventos sem correspondência satisfatória apresentam métricas adequadas para a aplicação do MVA. Assim, entre os 45 eventos, apenas 7 eventos adequados para MVA não apresentaram ajuste entre os planos de máxima e de mínima variância real e ideal. Portanto, o experimento mostrou 84,4% de eficiência para o *matching*.

Outro ponto que deve ser destacado é que o evento 13 da Tabela 22 apresenta um salto abrupto na componente do campo magnético no meio do evento. Assim, o vetor do campo magnético deixa de apresentar uma rotação suave, característica fundamental para análise de nuvens. Os eventos 7 e 9 na Tabela 19 (respectivamente, 8 e 45 da Tabela 22) possuem uma baixa rotação do vetor do campo magnético, que também é um recurso para identificar a nuvem. O evento 12 da Tabela 22 apresenta flutuação nas componentes H^+ , H^+temp , H^e/H^+ , e β_{plasma} . Neste caso, observamos que esse evento estava comprimido, não apresentando um cenário ideal para uma nuvem.

E por fim, os eventos 15 e 38 da Tabela 22, foram catalogados como candidatos a nuvem (*cl*) na Tabela 2 em Huttunen *et al.* (2005) e nesta análise estão bem caracterizados como MCs. Isso demonstra o potencial do método em analisar eventos novos.

4.3.6 Caracterização de eventos do mínimo solar do ciclo 24

Para este experimento, aplica-se a metodologia descrita na Seção 3.3 a fim de caracterizar eventos novos. Os eventos escolhidos estão catalogados como ICMEs no catálogo RC¹. Como, os dados mais recentes disponíveis para *download* a partir do satélite ACE² são até o dia 128 do ano de 2019, foram considerados apenas os eventos ocorridos no ano 2018, correspondendo ao início do mínimo solar do ciclo 24.

¹ <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm> acesso em 25 de fevereiro de 2021.

² <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/>, acesso em 25 de fevereiro de 2021.

Tabela 20 – Resultado da análise dos eventos do início do mínimo solar do ciclo 24 identificados como ICME no catálogo RC. Ou seja, análise de 07 eventos que ocorreram no ano de 2018. Na primeira coluna consta a identificação do evento, na segunda e na terceira constam o início e fim do evento e as demais colunas apresentam os resultados da análise. Ou seja, na quarta e quinta colunas ocorrem o tipo e a orientação identificados; na sexta, sétima e oitava constam os indicadores numéricos de consistência e a última coluna apresenta a rotação do eixo para *matching* quando esse foi possível e a expressão *NOT*, caso contrário.

#	Início MC (D/M/Y, h)	Fim MC (D/M/Y, h)	Tipo	(ϕ, θ) ° °	$\frac{\lambda_2}{\lambda_3}$	χ	P	Matching
1	9/3/2018,23	11/3/2018,00	SWN	(303,5)	8,3	143,0	12,6	$[B_A, B_T]$
2	13/5/2018,6	13/5/2018,14	SWN	(248,-13)	3,0	70,0	4,5	$[B_A, B_T]$
3	6/6/2018,11	7/6/2018,10	SWN	(279,-43)	5,5	71,4	6,1	$[B_A, -B_T]$
4	25/6/2018,10	26/6/2018,05	SWN	(312,-37)	5,3	137,0	8,4	$[B_A, B_T]$
5	30/6/2018,20	2/7/2018,10	—	—	3,2	50,8	2,8	NOT
6	10/7/2018,12	11/7/2018,03	NWS	(232,33)	9,1	104,1	13,8	$[-B_A, B_T]$
7	25/8/2018,12	26/8/2018,12	WSE	(4,-62)	10,1	123,8	7,9	$[-B_A, -B_T]$

Fonte: do Autor.

Com isso, o experimento consiste em analisar 07 eventos discriminados na Tabela 20. A identificação, o início e fim de cada evento constam nas três primeiras colunas da Tabela 20, enquanto as demais colunas apresentam os resultados da análise. Ou seja, na quarta e quinta colunas ocorrem o tipo e a orientação identificados; na sexta, sétima e oitava, constam os indicadores numéricos de consistência e a última coluna apresenta a rotação do eixo para *matching* quando esse foi possível e a expressão *NOT*, caso contrário.

Nesse caso, exceto o evento 5, todas as ICMEs identificadas no ano 2018 no catálogo RC apresentam características de MC. Dessas, 04 apresentam tubos de fluxo de tipo SWN, 1 NWS e 1 WSE; com isso apenas um evento foi unipolar e os demais bipolares. Além disso, observa-se que os menores valores para a métrica P correspondem aos eventos identificados com qualidade 1 no catálogo RC (são eles, os eventos 2, 4 e 5). Especificamente, o evento 5 não apresentou características de MC e pela métrica P , tem MVA inconsistente.

Com relação ao *matching*, observa-se que o MVA resultou em hodogramas adequados nos eventos 1, 2 e 4. Enquanto foram necessárias rotações nos eixos dos hodogramas para os eventos 3, 6 e 7. Isso significa que para esses últimos três eventos, deve-se considerar as respectivas mudanças no sinal dos autovetores obtidos no MVA. As visualizações geradas pelo programa podem ser vistas no Apêndice C.

5 Conclusões

O propósito geral desse trabalho está concentrado em estudar a geometria de uma nuvem magnética considerando o modelo livre de força e o método MVA. A fim de avançar no estado da arte em relação a correções e reinterpretações. Para tanto, a pesquisa foi aprofundada em duas linhas: estudo da degeneração do MVA e estudo comparativo da geometria do modelo livre de força com a solução do MVA.

A primeira investigação resultou em uma métrica, denominada *mathematical metric of Degenerate Eigenvalues Problem* (OLIVEIRA *et al.*, 2020). A métrica proposta envolve os comprimentos relativos dos eixos do elipsoide e mostra quão próximo da degeneração está o espaço de variância. Nesse caso, quanto mais próximo de zero, mais perto de ser degenerado.

A comparação teórica da nova métrica com as razões dos autovalores Lepping e Behannon (1980) ou Siscoe e Suey (1972) (vastamente utilizadas em outros trabalhos) é observada na Figura 19. A interpretação das isolinhas mostra que as razões não estão diretamente relacionadas à geometria do MVA, para baixos valores de P . No entanto, para λ_2 e λ_3 próximos de zero, as três condições tornam-se muito semelhantes.

A análise estatística em torno da razão de autovalores sobre todos os ICMEs no catálogo RC demonstra outra verificação da não aplicabilidade desta técnica. Isso pode ser visto na interpretação da Figura 17, em que há casos comprovados de nuvem magnética (identificados por MC2 no catálogo RC) que não respeitam o limiar da desigualdade da razão.

Além disso, na análise estatística, a distribuição da métrica proposta em relação aos eventos identificados como MCs apresenta um comportamento gaussiano, conforme mostrado na Figura 18a. Nesse caso, cerca de 90% desses eventos estão na faixa de $4,5 \leq P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) < 19,5$. Isso demonstra um resultado estatisticamente esperado, pois o experimento foi aplicado a um número representativo de eventos.

Assim, os resultados da Seção 4.1 demonstram a robustez da nova métrica para indicar se o MVA identifica de modo confiável os eixos de uma MC. Em outras palavras, é recomendado aplicar a métrica proposta para a validação do MVA no estudo das MCs. Se $P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) > 4,5$, então o método MVA é consistente.

A segunda proposta diz respeito a um sistema computacional, dotado de interface gráfica amigável, capaz de processar os dados do campo magnético de uma nuvem magnética provenientes de satélite e compará-los, componente a componente, ao modelo ideal livre de força rotacionado pelos ângulos latitudinal e longitudinal provenientes do MVA.

Para tanto, aplicou-se trigonometria para estudar os ângulos (ϕ, θ) do eixo da nuvem, obtidos pelo MVA para estimar a direção da MC ideal modelada pelo modelo livre de força. O estudo trigonométrico permite calcular esses ângulos para qualquer octante do espaço. Para este estudo, uma ferramenta computacional automática com interface gráfica, foi estruturada para relacionar os ângulos do eixo da nuvem com o tipo de tubo de fluxo.

Funções mencionadas na Seção 3.3 são inseridas na ferramenta computacional e seu objetivo inicial é promover uma melhor caracterização de eventos já conhecidos. Isso permite ao usuário realizar simulações com a visualização dos dados do evento, proporcionando reflexões em seu estudo.

No estudo de caso e na análise amostral discutidos na Seção 4.3, todos os eventos estudados foram corretamente classificados pelo experimento. Assim, a classificação automática do tipo de tubo de fluxo de acordo com eixo da MC foi consistente em 100% dos eventos estudados. Este resultado auxilia na inspeção visual para o ajuste dos planos de máxima e mínima variância com o modelo. Uma vez que 84,4% dos eventos analisados alcançaram correspondência satisfatória e ângulos (ϕ, θ) consistentes com a geometria. Por outro lado, para 15,6% dos eventos estudados, o ajuste não foi satisfatório. Ainda assim, nesses casos, os ângulos (ϕ, θ) obtidos também foram consistentes.

Concluindo, acreditamos que esta ferramenta será de grande valia para os pesquisadores que atuam na área de Clima Espacial por estar disponível para uso, ser de fácil manuseio e apresentar diversas maneiras de analisar um evento. Os sete eventos solares mínimos no ciclo 24 caracterizados na Seção 4.3.6 demonstram este potencial.

Como perspectiva futura, pretende-se automatizar a tomada de decisão ao final do sistema computacional. Assim, ao passo que o usuário entre com os dados da MC, o programa fornece os ângulos corretos (direção e sentido do eixo da MC), sem que seja necessária a interpretação humana para decisão final. Ainda, deseja-se extrair informações do sinal do campo magnético relativas às fronteiras da MC, para possível identificação automática de uma nuvem magnética dentro de um período maior considerado, por exemplo, um ano todo. Aliado a este propósito, pretende-se apresentar ao usuário uma janela de visualização do tubo de fluxo modelo com as características do evento real estudado. Será possível mover esta janela de maneira que o usuário possa observar e rotacionar o tubo de fluxo num panorama de 360°, incluindo sua posição relativa ao sistema Sol-Terra e ao satélite de observação. Após essas melhorias, é desejável realizar o mesmo processo com os outros modelos de MC da literatura e incluí-los na ferramenta computacional.

Referências

- ABDI, H.; WILLIAMS, L. J. Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, v. 2, n. 4, p. 433–459, 2010. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wics.101>>. Citado na página 47.
- BOTHMER, V.; RUST, D. M. The field configuration of magnetic clouds and the solar cycle. *Trans. Am. Geophys. Union*, v. 99, p. 139–146, 1997. Citado 3 vezes nas páginas 34, 47 e 65.
- BOTHMER, V.; SCHWENN, R. Eruptive prominences as sources of magnetic clouds in the solar wind. *Space Sci. Rev.*, v. 70, n. 1-2, p. 215–220, out. 1994. Citado na página 46.
- BOTHMER, V.; SCHWENN, R. The structure and origin of magnetic clouds in the solar wind. *Ann. Geophys.*, v. 16, p. 1–24, jan. 1998. Citado 6 vezes nas páginas 46, 47, 58, 65, 67 e 69.
- BURLAGA, L. *et al.* Magnetic loop behind an interplanetary shock - Voyager, Helios, and IMP 8 observations. *J. Geophys. Res.*, v. 86, p. 6673–6684, aug 1981. Citado 6 vezes nas páginas 33, 34, 37, 44, 47 e 65.
- BURLAGA, L. F. Magnetic clouds and force-free fields with constant alpha. *J. Geophys. Res.*, v. 93, p. 7217–7224, Jul 1988. Citado 7 vezes nas páginas 34, 37, 38, 39, 44, 47 e 65.
- BURLAGA, L. F. E. Magnetic Clouds. In: SCHWENN, R.; MARSCH, E. (Ed.). *Physics of the Inner Heliosphere II*. [S.l.: s.n.], 1991. v. 21, p. 152. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 37.
- CHRISTIAN, E. R.; DAVIS, A. J. *Advanced Composition Explorer (ACE) Mission Overview*. [S.l.], 1997. Disponível em: http://www.srl.caltech.edu/ACE/ace_mission.html. Acessado em 22 de novembro de 2020. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 59.
- CID, C. *et al.* Plasma and Magnetic Field Inside Magnetic Clouds: a Global Study. *Solar Phys.*, v. 207, n. 1, p. 187–198, May 2002. Citado na página 38.
- DASSO, S.; DÉMOULIN, P.; GULISANO, A. M. Magnetic clouds along the solar cycle: expansion and magnetic helicity. In: MANDRINI, C. H.; WEBB, D. F. (Ed.). *Comparative Magnetic Minima: Characterizing Quiet Times in the Sun and Stars*. [S.l.: s.n.], 2012. (IAU Symposium, v. 286), p. 139–148. Citado na página 39.
- DASSO, S. *et al.* Large scale MHD properties of interplanetary magnetic clouds. *Advances in Space Research*, v. 35, n. 5, p. 711–724, jan. 2005. Citado na página 42.
- DASSO, S. *et al.* A new model-independent method to compute magnetic helicity in magnetic clouds. *Astron. Astrophys.*, v. 455, n. 1, p. 349–359, ago. 2006. Citado na página 39.

DÉMOULIN, P.; DASSO, S.; JANVIER, M. Exploring the biases of a new method based on minimum variance for interplanetary magnetic clouds. *Astron. Astrophys.*, v. 619, p. A139, Nov 2018. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 65.

DÉMOULIN, P.; JANVIER, M.; DASSO, S. Magnetic Flux and Helicity of Magnetic Clouds. *Solar Phys.*, v. 291, n. 2, p. 531–557, fev. 2016. Citado na página 39.

DONG, D. *et al.* Spatiotemporal filtering using principal component analysis and Karhunen-Loeve expansion approaches for regional GPS network analysis. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, v. 111, n. B3, p. B03405, Mar 2006. Citado na página 47.

ECHER, E.; ALVES, M. V.; GONZALEZ, W. D. A statistical study of magnetic cloud parameters and geoeffectiveness. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, v. 67, n. 10, p. 839–852, Jul 2005. Citado na página 33.

ECHER, E.; GONZALEZ, W. D.; ALVES, M. V. Minimum Variance Analysis of Interplanetary Coronal Mass Ejections Around Solar Cycle 23 Maximum (1998 2002). *Solar Phys.*, v. 233, n. 2, p. 249–263, fev. 2006. Citado na página 47.

FARRUGIA, C. J.; OSHEROVICH, V. A.; BURLAGA, L. F. Magnetic flux rope versus the spheromak as models for interplanetary magnetic clouds. *J. Geophys. Res.*, v. 100, n. A7, p. 12293–12306, Jul 1995. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

GOLDSTEIN, H. On the field configuration in magnetic clouds. In: *NASA Conference Publication*. [S.l.: s.n.], 1983. (NASA Conference Publication, v. 228). Citado 4 vezes nas páginas 34, 39, 43 e 65.

GONZÁLEZ, A. O. *Identification and characterization of interplanetary magnetic clouds*. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE, http://www.inpe.br/posgraduacao/ges/arquivos/teses/tese_arian_ojeda_gonzaleza_2013.pdf, 2 2013. Citado na página 40.

GONZÁLEZ, A. O. *et al.* Spatio-temporal entropy analysis of the magnetic field to help magnetic cloud characterization. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, v. 118, n. 9, p. 5403–5414, Sep 2013. Citado 4 vezes nas páginas 34, 39, 44 e 65.

GONZÁLEZ, A. O. *et al.* Characterization of a double flux-rope magnetic cloud observed by ACE spacecraft on August 19–21, 1998. In: *AGU Spring Meeting Abstracts*. [S.l.: s.n.], 2013. v. 2013, p. SH31B–02. Citado na página 94.

GONZÁLEZ, A. Ojeda *et al.* Characterization of the Complex Ejecta Measured In Situ on 19 – 22 March 2001 by Six Different Methods. *Solar Phys.*, v. 292, p. 160, nov 2017a. Citado 6 vezes nas páginas 33, 37, 45, 64, 87 e 88.

GONZÁLEZ, A. Ojeda *et al.* An Alternative Method for Identifying Interplanetary Magnetic Cloud Regions. *Astrophys. J.*, v. 837, n. 2, p. 156, Mar 2017b. Citado na página 38.

GONZALEZ, W. D.; TSURUTANI, B. T. Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ($D_{st} < -100$ nT). *Planet. Space. Sci.*, v. 35, n. 9, p. 1101–1109, Sep 1987. Citado na página 33.

- GOSLING, J. T. *et al.* Direct observations of a flare related coronal and solar wind disturbance. *Solar Physics*, v. 40, p. 439–448, 02 1975. Citado na página 33.
- HOWARD, R. A. *et al.* The observation of a coronal transient directed at Earth. *Astrophys. J. Lett.*, v. 263, p. L101–L104, dez. 1982. Citado na página 33.
- HU, Q.; SONNERUP, B. U. Å.-. Reconstruction of two-dimensional structures in the magnetopause: Method improvements. *J. Geophys. Res.*, v. 108, p. 1011, jan. 2003. Citado na página 38.
- HU, Q.; SONNERUP, B. U. Ö. Reconstruction of magnetic flux ropes in the solar wind. *Geophys. Res. Lett.*, v. 28, p. 467–470, 2001. Citado na página 38.
- HU, Q.; SONNERUP, B. U. Ö. Reconstruction of magnetic clouds in the solar wind: Orientations and configurations. *J. Geophys. Res.*, v. 107, p. 1142, jul. 2002. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 65.
- HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing in Science and Engineering*, v. 9, n. 3, p. 90–95, May 2007. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 79.
- HUTTUNEN, K. E. J. *et al.* Properties and geoeffectiveness of magnetic clouds in the rising, maximum and early declining phases of solar cycle 23. *Ann. Geophys.*, v. 23, p. 625–641, fev. 2005. Citado 21 vezes nas páginas 23, 24, 34, 35, 46, 47, 53, 54, 65, 83, 84, 85, 87, 88, 90, 94, 96, 97, 98, 99 e 115.
- ISAVNIN, A.; VOURLIDAS, A.; KILPUA, E. K. J. Three-Dimensional Evolution of Erupted Flux Ropes from the Sun (2 - 20 R_☉) to 1 AU. *Solar Phys.*, v. 284, n. 1, p. 203–215, maio 2013. Citado na página 38.
- IVANOV, K. *et al.* Configuration, structure, and dynamics of magnetic clouds from solar flares in light of measurements on broad vega 1 and vega 2 in january - february 1986. *Solar Physics*, v. 120, p. 407–419, 1989. Citado na página 41.
- JOLLIFFE, I. *Principal Component Analysis*. 2nd. ed. [S.l.]: Springer, 2002. ISBN 0–387–95442–2. Citado na página 47.
- KARNEY, C. F. F.; DEAKIN, R. E. F.W. Bessel (1825): The calculation of longitude and latitude from geodesic measurements. *Astronomische Nachrichten*, v. 331, p. 852–861, ago. 2010. Citado na página 61.
- KELLY, P. M. Solar influence on North Atlantic mean sea level pressure. *Nature*, v. 269, n. 5626, p. 320–322, Sep 1977. Citado na página 47.
- KLEIN, L. W.; BURLAGA, L. F. Interplanetary magnetic clouds at 1 AU. *J. Geophys. Res.*, v. 87, n. A2, p. 613–624, Feb 1982. Citado 3 vezes nas páginas 37, 47 e 71.
- KORTH, H. *et al.* Comparison of birkeland current observations during two magnetic cloud events with mhd simulations. *Ann. Geophys*, European Geosciences Union, v. 26, p. 499–516, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 87 e 88.
- KOVALIC, T.; SZABO, A. *Comprehensive Solar Wind Laboratory for Long-Term Solar Wind Measurements*. [S.l.], 2004. Disponível em: https://wind.nasa.gov/mfi/mag_cloud_pub1.html. Acessado em 05 de fevereiro de 2021. Citado na página 114.

- LAGO, A. D. *et al.* Compression of magnetic clouds in interplanetary space and increase in their geoeffectiveness. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 63, n. 5, p. 451–455, Mar 2001. Citado na página 33.
- LEPPING, R. *et al.* A summary of wind magnetic clouds for years 1995-2003: model-fitted parameters, associated errors and classifications. In: *Annales Geophysicae*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 24, n. 1, p. 215–245. Citado na página 69.
- LEPPING, R. P.; BEHANNON, K. W. Magnetic field directional discontinuities: 1. Minimum variance errors. *J. Geophys. Res.*, v. 85, n. A9, p. 4695–4704, Sep 1980. Citado 10 vezes nas páginas 16, 34, 54, 61, 64, 74, 76, 77, 81 e 103.
- LEPPING, R. P.; BURLAGA, L. F.; JONES, J. A. Magnetic field structure of interplanetary magnetic clouds at 1 AU. *J. Geophys. Res.*, v. 95, p. 11957–11965, ago. 1990. Citado 14 vezes nas páginas 24, 33, 34, 35, 37, 38, 39, 63, 64, 65, 77, 87, 88 e 111.
- LEPPING, R. P. *et al.* Model Fitting of Wind Magnetic Clouds for the Period 2004 - 2006. *Solar Phys.*, v. 295, n. 6, p. 83, jun. 2020. Citado na página 39.
- LIPSCHUTZ, S. *Álgebra Linear. Coleção Schaum*. 3th. ed. [S.l.]: Pearson, Makron Books, 1994. Citado na página 52.
- LUGAZ, N.; FARRUGIA, C. J. A new class of complex ejecta resulting from the interaction of two CMEs and its expected geoeffectiveness. *Geophys. Res. Lett.*, v. 41, p. 769–776, fev. 2014. Citado 3 vezes nas páginas 38, 87 e 88.
- LUI, A. T. Y. Grad-Shafranov Reconstruction of Magnetic Flux Ropes in the Near-Earth Space. *Space Sci. Rev.*, v. 158, p. 43–68, jan. 2011. Citado na página 38.
- LUNDH, F. An introduction to tkinter. 1999. Disponível em: <www.pythonware.com/library/tkinter/introduction/index.htm>. Citado na página 79.
- LUNDQUIST, S. Magneto-hydrostatic fields. *Arkiv for fysik*, Royal swedish acad sciences publ dept box 50005, S-104 05 stockholm, sweden, v. 2, n. 4, p. 361–365, 1950. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 43.
- LYNCH, B. J. *et al.* Internal structure of magnetic clouds: Plasma and composition. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, v. 108, n. A6, p. 1239, jun. 2003. Citado 3 vezes nas páginas 65, 87 e 88.
- MARSH, G. E. *Force-Free Magnetic Fields: Solutions, Topology and Applications*. [S.l.: s.n.], 1996. Citado na página 42.
- MARUBASHI, K. Structure of the interplanetary magnetic clouds and their solar origins. *Adv. Space. Res.*, v. 6, p. 335–338, Jan 1986. Citado 4 vezes nas páginas 38, 39, 45 e 65.
- MARUBASHI, K.; LEPPING, R. P. Long-duration magnetic clouds: a comparison of analyses using torus- and cylinder-shaped flux rope models. *Ann. Geophys.*, v. 25, p. 2453–2477, nov 2007. Citado 3 vezes nas páginas 38, 87 e 88.
- MCKINNEY, W. Data structures for statistical computing in python. In: WALT, S. van der; MILLMAN, J. (Ed.). *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 51 – 56. Citado na página 53.

- MIERLA, M. *et al.* On the 3-d reconstruction of coronal mass ejections using coronagraph data. *Annales Geophysicae*, v. 28, n. 1, p. 203–215, 2010. Disponível em: <<https://angeo.copernicus.org/articles/28/203/2010/>>. Citado na página 33.
- MULLIGAN, T.; RUSSELL, C. T. Multispacecraft modeling of the flux rope structure of interplanetary coronal mass ejections: Cylindrically symmetric versus nonsymmetric topologies. *J. Geophys. Res.*, v. 106, n. A6, p. 10581–10596, Jun 2001. Citado na página 38.
- MULLIGAN, T.; RUSSELL, C. T.; LUHMANN, J. G. Solar cycle evolution of the structure of magnetic clouds in the inner heliosphere. *Geophys. Res. Lett.*, v. 25, n. 15, p. 2959–2962, jan. 1998. Citado na página 46.
- NIEVES-CHINCILLA, T.; HIDALGO, M. A.; SEQUEIROS, J. Magnetic Clouds Observed at 1 Au During the Period 2000-2003. *Solar Phys.*, v. 232, p. 105–126, nov. 2005. Citado 3 vezes nas páginas 38, 87 e 88.
- NIEVES-CHINCILLA, T. *et al.* A Circular-cylindrical Flux-rope Analytical Model for Magnetic Clouds. *Astrophys. J.*, v. 823, n. 1, p. 27, maio 2016. Citado na página 39.
- NIEVES-CHINCILLA, T. *et al.* Elliptic-cylindrical Analytical Flux Rope Model for Magnetic Clouds. *Astrophys. J.*, v. 861, n. 2, p. 139, jul. 2018. Citado na página 39.
- OJEDA, A. *et al.* Analysis of behavior of solar wind parameters under different IMF conditions using nonlinear dynamics techniques. *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, v. 67, p. 1859–1864, dez. 2005. Citado na página 64.
- OLIVEIRA, R. A. R. *et al.* New Metric for Minimum Variance Analysis Validation in the Study of Interplanetary Magnetic Clouds. *Solar Phys.*, v. 295, n. 3, p. 45, mar. 2020. Citado 5 vezes nas páginas 62, 63, 65, 81 e 103.
- OLIVEIRA, R. A. R. *et al.* Methodology to resolve inconsistencies between the inclination of the magnetic cloud axis and the associated flux rope type: Case study. *Solar Phys.*, x, n. x, p. xx, x 2021. Citado na página 79.
- PEARSON, K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Taylor & Francis, v. 2, n. 11, p. 559–572, 1901. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/14786440109462720>>. Citado na página 47.
- PRIEST, E. R.; FORBES, T. G. Magnetic Field Evolution during Prominence Eruptions and Two-Ribbon Flares. *Solar Phys.*, v. 126, n. 2, p. 319–350, Apr 1990. Citado na página 34.
- RICHARDSON, I. G.; CANE, H. V. Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections During Solar Cycle 23 (1996 - 2009): Catalog and Summary of Properties. *Solar Phys.*, v. 264, p. 189–237, jun. 2010. Citado 3 vezes nas páginas 63, 87 e 88.
- RICHARDSON, I. G.; ZHANG, J. Multiple-step geomagnetic storms and their interplanetary drivers. *Geophys. Res. Lett.*, v. 35, n. 6, p. L06S07, jan. 2008. Citado 2 vezes nas páginas 87 e 88.
- SCHWENN, R. Space Weather: The Solar Perspective. *Living Rev. Sol. Phys.*, v. 3, p. 2, ago. 2006. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 37.

- SCHWENN, R.; MARSCH, E.; JACKSON, B. V. Book-Review - Physics of the Inner Heliosphere - Part Two - Particles Waves and Turbulence. *Solar Phys.*, v. 145, p. 405, jun. 1993. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 37.
- SILVA, N. R. d. *et al.* Leaf epidermis images for robust identification of plants. *Scientific Reports*, v. 6, p. 25994, maio 2016. Citado na página 47.
- SISCOE, G. L.; SUEY, R. W. Significance criteria for variance matrix applications. *J. Geophys. Res.*, v. 77, p. 1321–1322, mar. 1972. Citado 5 vezes nas páginas 16, 34, 76, 77 e 103.
- SMITH, C. W. *et al.* The ACE Magnetic Fields Experiment. *Space Sci. Rev.*, v. 86, p. 613–632, jul. 1998. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.
- SONNERUP, B. U. O.; CAHILL L. J., J. Magnetopause Structure and Attitude from Explorer 12 Observations. *J. Geophys. Res.*, v. 72, p. 171, Jan 1967. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 47.
- SONNERUP, B. U. Ö.; SCHEIBLE, M. Minimum and Maximum Variance Analysis. *ISSI Scientific Reports Series*, v. 1, p. 185–220, 1998. Citado 4 vezes nas páginas 34, 47, 48 e 53.
- STEWART, J. *Cálculo, Vol.2*. [S.l.]: Cengage Learning, 2013. Citado na página 48.
- VANDAS, M.; FISCHER, S.; GERANIOS, A. Spherical and cylindrical models of magnetized plasma clouds and their comparison with spacecraft data. *Planetary and Space Science*, v. 39, n. 8, p. 1147 – 1154, 1991. ISSN 0032-0633. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0032063391901668>>. Citado na página 38.
- VANDAS, M.; ODSTRČIL, D.; WATARI, S. Three-dimensional MHD simulation of a loop-like magnetic cloud in the solar wind. *J. Geophys. Res.*, v. 107, n. A9, p. 1236, 2002. Citado na página 38.
- VANDAS, M.; ROMASHETS, E. Toroidal Flux Ropes with Elliptical Cross Sections and Their Magnetic Helicity. *Solar Phys.*, v. 292, n. 9, p. 129, set. 2017. Citado na página 39.
- WALT, S. Van der; COLBERT, S. C.; VAROQUAUX, G. The NumPy Array: A Structure for Efficient Numerical Computation. *Computing in Science and Engineering*, v. 13, n. 2, p. 22–30, Mar 2011. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 79.

APÊNDICE A – Tabela WIND

Tabela 21 – Nuvens magnéticas catalogadas de acordo com [Leping, Burlaga e Jones \(1990\)](#) a partir dos dados do meio interplanetário. A coluna 1 identifica o evento. As colunas 2 e 3 mostram o início e fim da nuvem com os dados: ano(Y), mês(M), dia(D), DOY e hora(H). A coluna 4 apresenta a qualidade da nuvem magnética.

Code No.	START Y / M / D / DOY / H	END M / D / (DOY) / H	Quality*
1	1995 / Feb / 8 / 39 / 5.8	Feb / 9 / 40 / 0.8	2
2	1995 / Mar / 4 / 63 / 10.8	Mar / 5 / 64 / 3.8	3
2.2	1995 / Apr / 3 / 93 / 7.8	Apr / 4 / 94 / 10.8	2
3	1995 / Apr / 6 / 96 / 7.3	Apr / 6 / 96 / 17.8	2
4	1995 / May / 13 / 133 / 10.9	May / 13 / 133 / 16.4	3
5	1995 / Aug / 22 / 234 / 21.3	Aug / 23 / 235 / 19.3	2
6	1995 / Oct / 18 / 291 / 19.8	Oct / 20 / 293 / 1.3	1
7	1995 / Dec / 16 / 350 / 5.3	Dec / 16 / 350 / 22.3	3
8	1996 / May / 27 / 148 / 15.3	May / 29 / 150 / 7.3	2
9	1996 / Jul / 1 / 183 / 17.3	Jul / 2 / 184 / 10.3	2
10	1996 / Aug / 7 / 220 / 12.3	Aug / 8 / 221 / 10.8	1
11	1996 / Dec / 24 / 359 / 2.8	Dec / 25 / 360 / 11.3	1
12	1997 / Jan / 10 / 10 / 5.3	Jan / 11 / 11 / 2.3	1
13	1997 / Feb / 10 / 41 / 3.4	Feb / 10 / 41 / 18.4	3
14.1	1997 / Apr / 11 / 101 / 5.6	Apr / 11 / 101 / 19.1	2
14.2	1997 / Apr / 21 / 111 / 14.5	Apr / 23 / 113 / 6.5	3
15	1997 / May / 15 / 135 / 9.1	May / 16 / 136 / 1.1	2
16	1997 / May / 16 / 136 / 6.1	May / 16 / 136 / 13.9	3
17	1997 / Jun / 9 / 160 / 2.3	Jun / 9 / 160 / 23.3	2
18	1997 / Jun / 19 / 170 / 5.1	Jun / 19 / 170 / 15.9	3
19	1997 / Jul / 15 / 196 / 8.8	Jul / 15 / 196 / 23.8	3
20	1997 / Aug / 3 / 215 / 14.1	Aug / 4 / 216 / 1.9	3
21	1997 / Sep / 18 / 261 / 0.5	Sep / 20 / 263 / 12.5	3
22	1997 / Sep / 22 / 265 / 0.8	Sep / 22 / 265 / 17.3	2
23	1997 / Oct / 1 / 274 / 16.3	Oct / 2 / 275 / 22.8	2
24	1997 / Oct / 10 / 283 / 23.8	Oct / 12 / 285 / 0.8	1
25	1997 / Nov / 7 / 311 / 15.8	Nov / 8 / 312 / 4.3	2

*Quality: 1 = Excelente, 2= Boa, 3= Ruim.

Continua na próxima página

Tabela 21 – Continuação da página anterior

Code No.	START Y / M / D / DOY / H	END M / D / (DOY) / H	Quality*
26	1997 / Nov / 8 / 312 / 4.9	Nov / 8 / 312 / 14.9	2
27	1997 / Nov / 22 / 326 / 15.8	Nov / 23 / 327 / 12.3	3
28	1998 / Jan / 7 / 7 / 3.3	Jan / 8 / 8 / 8.3	1
29	1998 / Jan / 8 / 8 / 14.9	Jan / 8 / 8 / 21.6	3
30	1998 / Feb / 4 / 35 / 4.5	Feb / 5 / 36 / 22.5	2
31	1998 / Mar / 4 / 63 / 14.3	Mar / 6 / 65 / 6.3	1
32	1998 / May / 2 / 122 / 12.3	May / 3 / 123 / 17.3	3
33	1998 / Jun / 2 / 153 / 10.6	Jun / 2 / 153 / 15.9	2
34	1998 / Jun / 24 / 175 / 16.8	Jun / 25 / 176 / 21.8	2
35	1998 / Aug / 20 / 232 / 10.3	Aug / 21 / 233 / 19.3	1
36	1998 / Sep / 25 / 268 / 10.3	Sep / 26 / 269 / 13.3	2
37	1998 / Oct / 19 / 292 / 5.1	Oct / 19 / 292 / 14.6	3
38	1998 / Nov / 8 / 312 / 23.8	Nov / 10 / 314 / 1.3	1
39	1999 / Feb / 18 / 49 / 14.3	Feb / 19 / 50 / 12.3	3
40	1999 / Apr / 16 / 106 / 20.3	Apr / 17 / 107 / 21.3	3
41	1999 / Aug / 9 / 221 / 10.8	Aug / 10 / 222 / 15.8	1
42	1999 / Sep / 21 / 264 / 21.1	Sep / 22 / 265 / 5.1	3
43	2000 / Feb / 12 / 43 / 17.1	Feb / 13 / 44 / 0.6	3
44.1	2000 / Feb / 21 / 52 / 9.8	Feb / 22 / 53 / 13.3	3
44.2	2000 / Jun / 24 / 176 / 8.3	Jun / 25 / 177 / 20.3	3
44.3	2000 / Jul / 1 / 183 / 8.8	Jul / 2 / 184 / 3.3	1
45	2000 / Jul / 15 / 197 / 6.8	Jul / 15 / 197 / 14.3	2
46	2000 / Jul / 15 / 197 / 21.1	Jul / 16 / 198 / 9.9	2
47	2000 / Jul / 28 / 210 / 21.1	Jul / 29 / 211 / 10.1	2
48	2000 / Aug / 1 / 214 / 0.1	Aug / 1 / 214 / 15.9	3
49	2000 / Aug / 12 / 225 / 6.1	Aug / 13 / 226 / 5.1	2
50	2000 / Sep / 18 / 262 / 1.9	Sep / 18 / 262 / 15.1	3
51	2000 / Oct / 3 / 277 / 17.1	Oct / 4 / 278 / 14.1	1
52	2000 / Oct / 13 / 287 / 18.4	Oct / 14 / 288 / 16.9	2
53	2000 / Oct / 28 / 302 / 23.3	Oct / 30 / 304 / 0.3	3
54	2000 / Nov / 6 / 311 / 23.1	Nov / 7 / 312 / 18.1	2
55.1	2001 / Mar / 19 / 78 / 23.3	Mar / 20 / 79 / 18.3	1
55.2	2001 / Mar / 20 / 79 / 17.8	Mar / 22 / 81 / 14.8	3
56	2001 / Apr / 4 / 94 / 20.9	Apr / 5 / 95 / 8.4	1
57	2001 / Apr / 12 / 102 / 7.9	Apr / 12 / 102 / 17.9	2
58	2001 / Apr / 22 / 112 / 0.9	Apr / 23 / 113 / 1.4	2

*Quality: 1 = Excelente, 2= Boa, 3= Ruim.

Continua na próxima página

Tabela 21 – Continuação da página anterior

Code No.	START Y / M / D / DOY / H	END M / D / (DOY) / H	Quality*
59	2001 / Apr / 29 / 119 / 1.9	Apr / 29 / 119 / 12.9	2
60	2001 / May / 28 / 148 / 11.9	May / 29 / 149 / 10.4	1
61	2001 / Jul / 10 / 191 / 17.3	Jul / 12 / 193 / 8.8	2
62	2001 / Oct / 31 / 304 / 21.3	Nov / 2 / 306 / 10.3	3
63	2001 / Nov / 24 / 328 / 15.8	Nov / 25 / 329 / 13.3	3
64	2002 / Mar / 19 / 78 / 22.9	Mar / 20 / 79 / 15.4	2
65	2002 / Mar / 24 / 83 / 3.8	Mar / 25 / 84 / 22.8	2
66	2002 / Apr / 18 / 108 / 4.3	Apr / 19 / 109 / 2.3	1
67	2002 / Apr / 20 / 110 / 11.8	Apr / 21 / 111 / 16.8	3
68	2002 / May / 19 / 139 / 3.9	May / 19 / 139 / 23.4	1
69	2002 / May / 23 / 143 / 23.4	May / 24 / 144 / 16.9	3
70	2002 / Aug / 1 / 213 / 11.9	Aug / 1 / 213 / 22.6	3
71	2002 / Aug / 2 / 214 / 7.4	Aug / 2 / 214 / 21.1	2
72.1	2002 / Sep / 3 / 246 / 0.3	Sep / 3 / 246 / 18.8	2
72.2	2002 / Sep / 30 / 273 / 22.6	Oct / 1 / 274 / 11.9	3
73	2003 / Mar / 20 / 79 / 11.9	Mar / 20 / 79 / 22.4	1
74	2003 / Jun / 17 / 168 / 17.8	Jun / 18 / 169 / 8.3	3
75	2003 / Jul / 10 / 191 / 19.9	Jul / 11 / 192 / 8.9	3
76	2003 / Aug / 18 / 230 / 11.6	Aug / 19 / 231 / 4.4	2
77	2003 / Nov / 20 / 324 / 10.8	Nov / 21 / 325 / 2.3	2
78	2004 / Apr / 4 / 95 / 2.8	Apr / 5 / 96 / 14.8	2
79	2004 / Jul / 22 / 204 / 15.4	Jul / 22 / 204 / 23.1	3
80	2004 / Jul / 24 / 206 / 12.8	Jul / 25 / 207 / 13.3	2
81	2004 / Aug / 29 / 242 / 18.7	Aug / 30 / 243 / 20.8	1
82	2004 / Nov / 8 / 313 / 3.4	Nov / 8 / 313 / 16.6	2
83	2004 / Nov / 9 / 314 / 20.9	Nov / 10 / 315 / 3.4	2
84	2004 / Nov / 10 / 315 / 3.6	Nov / 10 / 315 / 11.1	2
85	2005 / May / 15 / 135 / 5.7	May / 15 / 135 / 22.3	2
86	2005 / May / 20 / 140 / 7.3	May / 21 / 141 / 5.3	2
87	2005 / Jun / 12 / 163 / 15.6	Jun / 13 / 164 / 7.1	2
88	2005 / Jun / 15 / 166 / 5.8	Jun / 16 / 167 / 7.8	3
89	2005 / Jul / 17 / 198 / 15.3	Jul / 18 / 199 / 3.8	2
90	2005 / Oct / 31 / 304 / 2.9	Oct / 31 / 304 / 20.4	3
91	2005 / Dec / 31 / 365 / 14.8	Jan / 1 / 1 / 10.8	2
92	2006 / Feb / 5 / 36 / 19.1	Feb / 6 / 37 / 13.1	2
93	2006 / Apr / 13 / 103 / 14.8	Apr / 13 / 103 / 20.8	3

*Quality: 1 = Excelente, 2= Boa, 3= Ruim.

Continua na próxima página

Tabela 21 – Continuação da página anterior

Code No.	START Y / M / D / DOY / H	END M / D / (DOY) / H	Quality*
94	2006 / Apr / 13 / 103 / 20.6	Apr / 14 / 104 / 9.9	2
95	2006 / Aug / 30 / 242 / 21.1	Aug / 31 / 243 / 14.9	2
96	2006 / Sep / 30 / 273 / 8.6	Sep / 30 / 273 / 21.6	3
97	2006 / Dec / 14 / 348 / 22.8	Dec / 15 / 349 / 19.8	3
98	2007 / Mar / 24 / 83 / 3.1	Mar / 24 / 83 / 16.9	3
99	2007 / May / 21 / 141 / 22.9	May / 22 / 142 / 13.6	2
100	2007 / Nov / 19 / 323 / 23.4	Nov / 20 / 324 / 12.9	2

*Quality: 1 = Excelente, 2= Boa, 3= Ruim.

Fim da Tabela 21

Fonte: [Kovalic e Szabo \(2004\)](#).

APÊNDICE B – Detalhamento da análise de resultados

Tabela 22 – Resultado da análise dos eventos identificados em [Huttunen et al. \(2005\)](#), catalogados pelo satélite ACE e que não apresentaram gaps maiores que 5 horas em suas componentes. Na primeira coluna consta a identificação do evento, na segunda e na terceira constam o início e fim do evento e as demais colunas apresentam os resultados da análise. Ou seja, na quarta e quinta colunas ocorrem o tipo e a orientação identificados; na sexta, sétima e oitava constam os indicadores numéricos de consistência e a última coluna apresenta a rotação do eixo para *matching* quando esse foi possível e a expressão *NOT*, caso contrário.

#	Início MC (D/M/Y, h)	Fim MC (D/M/Y, h)	Tipo	(ϕ, θ) ° °	$\frac{\lambda_2}{\lambda_3}$	χ	P	Matching
1	2/6/1998,10	2/6/1998,16	SEN	(67,-24)	15,8	44,8	15,8	$[B_A, B_T]$
2	14/6/1998,2	15/6/1998,0	SWN	(254,-19)	4,4	101,9	10,1	$[B_A, -B_T]$
3	24/6/1998,17	25/6/1998,16	SEN	(164,17)	3,0	129,0	7,5	$[-B_A, -B_T]$
4	25/9/1998,8	26/9/1998,12	WNE	(168,51)	15,1	95,0	16,1	$[B_A, -B_T]$
5	19/10/1998,4	19/10/1998,22	NES	(91,43)	4,5	112,0	8,2	$[-B_A, B_T]$
6	8/11/1998,23	10/11/1998,0	ESW	(71,-52)	1,9	167,0	0,1	$[B_A, B_T]$
7	13/11/1998,4	14/11/1998,0	ESW	(227,-68)	2,8	126,5	7,4	$[B_A, -B_T]$
8	18/2/1999,14	19/2/1999,10	NWS	(280,-4)	3,8	66,0	7,7	$[-B_A, -B_T]$
9	25/3/1999,16	25/3/1999,23	SEN	(119,-23)	6,5	59,8	12,3	$[-B_A, B_T]$
10	16/4/1999,18	17/4/1999,18	WSE	(5,-71)	12,3	116,0	14,3	NOT
11	21/4/1999,12	22/4/1999,15	SEN	(50,-34)	1,9	100,1	4,8	$[-B_A, -B_T]$
12	9/8/1999,10	10/8/1999,14	WNE	(114,73)	5,7	145,1	11,4	NOT
13	22/8/1999,12	23/8/1999,06	ESW	(98,-59)	3,9	123,3	9,5	NOT
14	21/9/1999,20	22/9/1999,10	SEN	(81,-21)	2,2	102,6	5,2	$[-B_A, B_T]$
15	14/11/1999,01	14/11/1999,07	NES	(109,18)	7,9	64,0	13,1	$[B_A, B_T]$
16	12/2/2000,12	13/2/2000,0	NWS	(208,-20)	3,3	102,9	8,5	$[B_A, -B_T]$
17	21/2/2000,15	22/2/2000,11	WNE	(166,59)	2,8	110,3	7,5	$[B_A, B_T]$
18	12/7/2000,1	13/7/2000,2	SEN	(21,-16)	2,1	75,2	5,3	$[B_A, B_T]$
19	15/7/2000,19	16/7/2000,12	SEN	(57,-27)	5,7	125,0	9,5	$[B_A, B_T]$
20	28/7/2000,18	29/7/2000,9	NWS	(309,8)	1,7	143,0	0,1	$[-B_A, B_T]$
21	31/7/2000,23	1/8/2000,12	NES	(100,-28)	4,2	44,1	9,9	$[-B_A, B_T]$

Continua na próxima página

Tabela 22 – Continuação da página anterior

#	Início MC (D/M/Y, h)	Fim MC (D/M/Y, h)	Tipo	(ϕ, θ) ° °	$\frac{\lambda_2}{\lambda_3}$	χ	P	Matching
22	10/8/2000,20	11/8/2000,6	—	—	1,4	47,0	2,3	NOT
23	12/8/2000,5	13/8/2000,2	SEN	(97,-12)	8,5	159,0	11,0	$[B_A, -B_T]$
24	18/9/2000,0	18/9/2000,14	ENW	(308,62)	2,6	123,8	5,6	$[-B_A, -B_T]$
25	3/10/2000,16	4/10/2000,13	NES	(53,29)	9,0	147,8	14,0	$[B_A, -B_T]$
26	13/10/2000,17	14/10/2000,5	NES	(31,2)	8,9	48,0	13,9	$[B_A, B_T]$
27	29/10/2000,2	29/10/2000,14	SEN	(133,-3)	2,4	45,8	5,9	$[-B_A, -B_T]$
28	6/11/2000,23	7/11/2000,15	SEN	(107,-13)	3,9	111,6	8,9	$[-B_A, -B_T]$
29	4/3/2001,16	5/3/2001,01	ESW	—	1,5	94,8	3,2	NOT
30	27/3/2001,22	28/3/2001,5	SEN	(177,13)	2,3	92,8	5,3	$[B_A, B_T]$
31	12/4/2001,6	13/4/2001,0	WNE	(19,88)	4,5	73	9,9	NOT
32	22/4/2001,0	23/4/2001,0	WSE	(276,-59)	8,6	167,8	12,6	NOT
33	29/4/2001,1	29/4/2001,13	SEN	(122,-10)	7,8	126,7	12,5	$[B_A, B_T]$
34	28/5/2001,11	29/5/2001,6	SEN	(52,-38)	4,6	113,7	10,4	$[-B_A, -B_T]$
35	18/6/2001,23	19/6/2001,14	SEN	(81,-18)	5,2	147,1	6,8	$[B_A, B_T]$
36	10/7/2001,17	11/7/2001,23	SWN	(252,6)	3,7	135,7	9,0	$[B_A, B_T]$
37	3/10/2001,6	3/10/2001,16	SEN	(118,-41)	14,5	145,0	16,1	$[-B_A, -B_T]$
38	24/11/2001,17	25/11/2001,13	SEN	(111,31)	2,2	32,7	5,8	$[-B_A, -B_T]$
39	28/2/2002,20	1/3/2002,10	SWN	(308,-33)	6,4	131,0	7,6	$[B_A, -B_T]$
40	19/3/2002,23	20/3/2002,10	NES	(65,23)	4,0	54,5	8,6	$[B_A, B_T]$
41	24/3/2002,12	25/3/2002,12	NWS	(282,8)	2,1	68,0	4,8	$[-B_A, -B_T]$
42	18/4/2002,0	19/4/2002,1	SWN	(355,-29)	2,1	93,6	5,3	$[B_A, B_T]$
43	20/4/2002,13	21/4/2002,07	SEN	(158,34)	4,4	93,1	9,7	$[-B_A, B_T]$
44	19/5/2002,3	20/5/2002,0	SEN	(31,28)	1,5	44,3	3,0	$[-B_A, -B_T]$
45	2/8/2002,6	2/8/2002,22	NWS	(280,-23)	2,8	33,4	7,4	$[B_A, -B_T]$
46	30/9/2002,23	1/10/2002,15	NES	(129,21)	5,4	162,0	11,5	$[B_A, B_T]$
47	27/1/2003,01	27/1/2003,15	NWS	(342,-41)	1,0	60,8	0,6	$[B_A, B_T]$
48	20/3/2003,13	20/3/2003,22	WSE	—	6,8	105,1	12,4	NOT
49	18/8/2003,6	19/8/2003,11	SWN	(356,-29)	6,4	101,3	10,9	$[-B_A, -B_T]$
50	20/11/2003,11	21/11/2003,0	ESW	(7,-75)	15,2	168,4	15,7	NOT

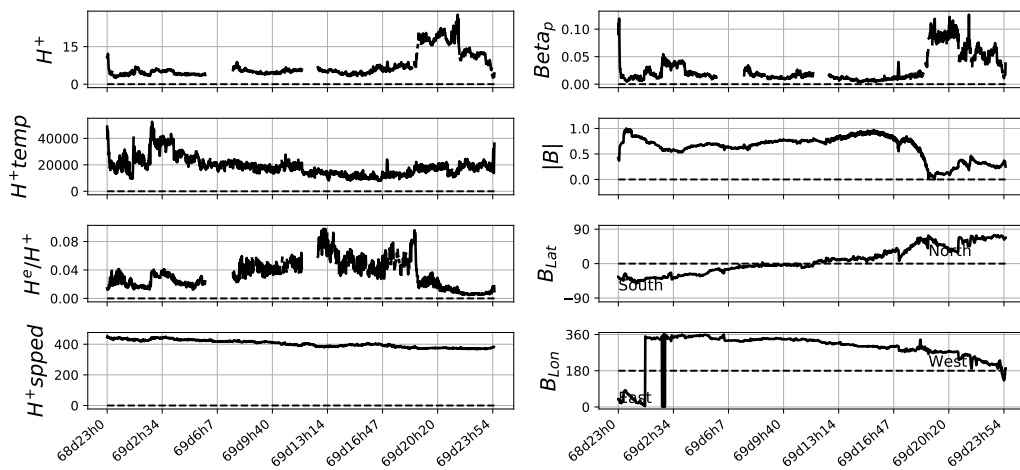
Fim da Tabela 22

Fonte: do Autor.

APÊNDICE C – Detalhamento dos eventos do mínimo solar do ciclo 24

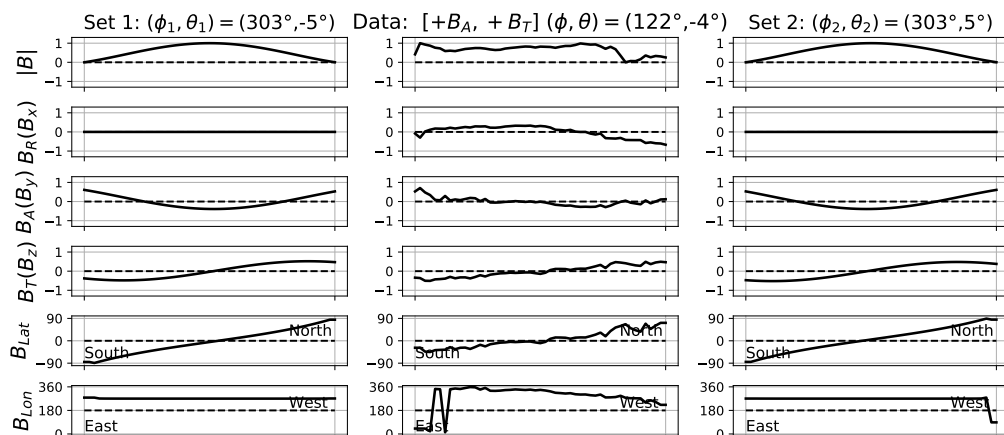
Evento 1 da Tabela 20

Figura 43 – Quadro *Data Set* do evento 1 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 23 h de 09 de março de 2018 às 00 h de 11 de março de 2018.



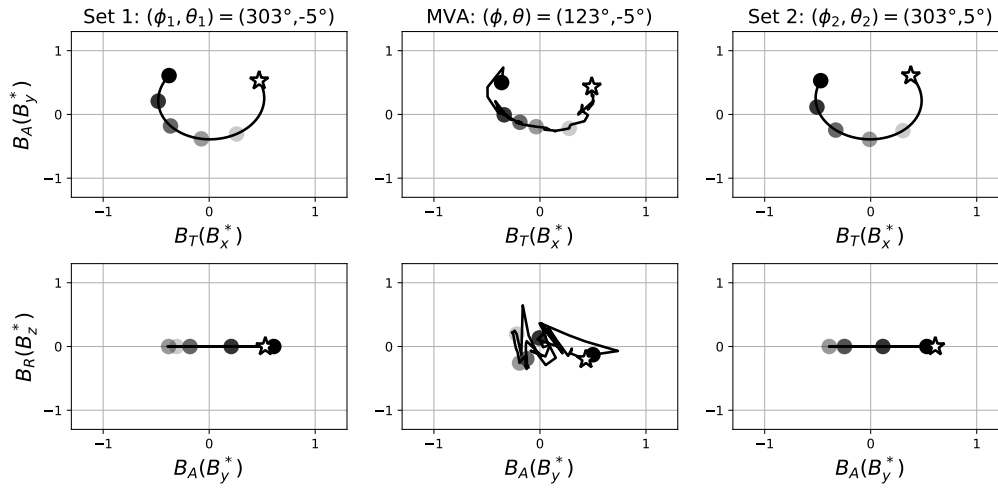
FONTE: do Autor.

Figura 44 – Quadro *Axes Directions* do evento 1 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 23 h de 09 de março de 2018 às 00 h de 11 de março de 2018.



FONTE: do Autor.

Figura 45 – Quadro *MVA Hodogram* do evento 1 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 23 h de 09 de março de 2018 às 00 h de 11 de março de 2018.



FONTE: do Autor.

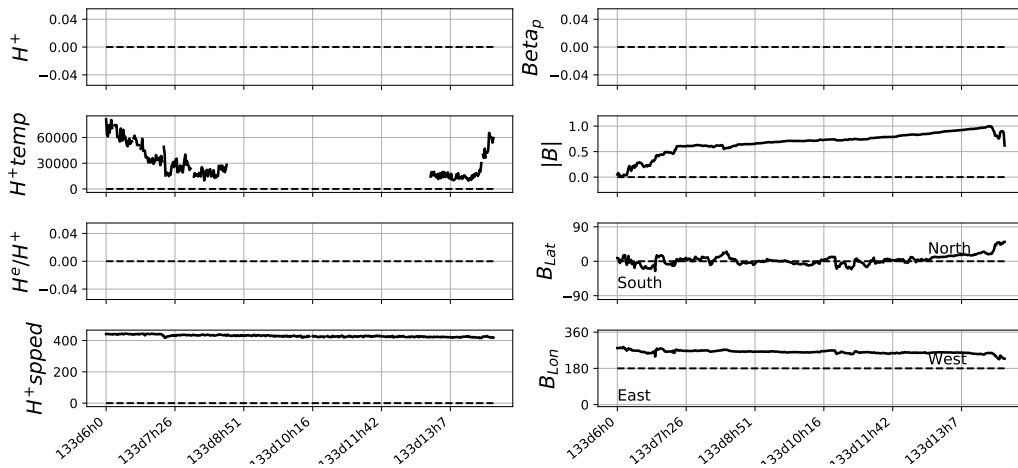
Figura 46 – Quadro *MVA Results* do evento 1 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 23 h de 09 de março de 2018 às 00 h de 11 de março de 2018.

MVA Output [+ B_A , + B_T]	MVA Validation	Results
$(\phi, \theta) = (122.55^\circ, -4.76^\circ)$		
$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (76.15, 26.46, 3.16)$	$\lambda_2/\lambda_3 = 8.371$ MVA consistent	Set 1: $(\phi_1, \theta_1) = (303^\circ, -5^\circ)$
\hat{x}_1 (GSE) = (-0.551, -0.274, 0.789)	$P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = 12.609$ MVA consistent	Set 2: $(\phi_2, \theta_2) = (303^\circ, 5^\circ)$
\hat{x}_2 (GSE) = (-0.536, 0.840, -0.083)	$\chi = 143.08^\circ$ large angular rotation	Type and Hand: SWN and R
\hat{x}_3 (GSE) = (-0.640, -0.468, -0.609)		

FONTE: do Autor.

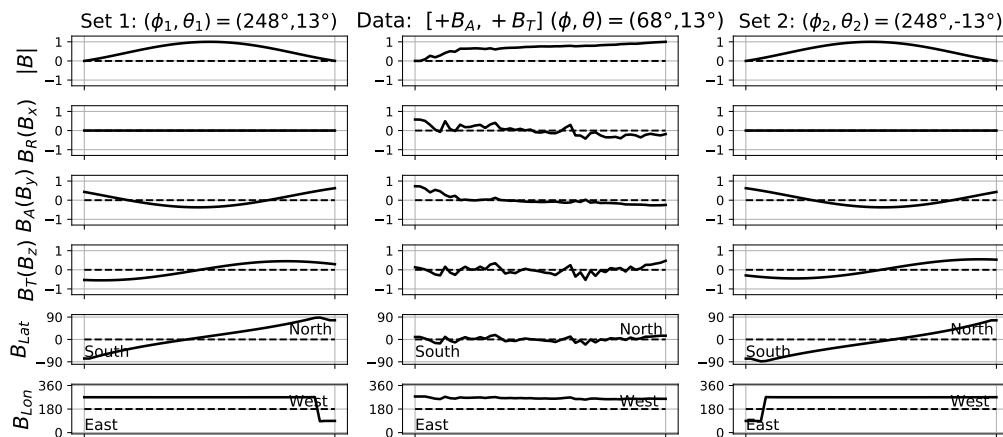
Evento 2 da Tabela 20

Figura 47 – Quadro *Data Set* do evento 2 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 06 h de 13 de maio de 2018 às 14 h de 13 de maio de 2018.



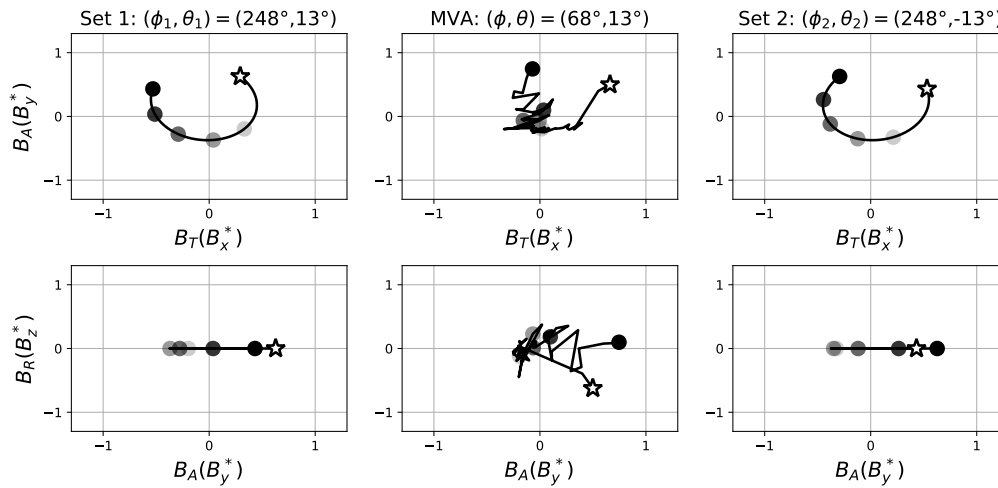
FONTE: do Autor.

Figura 48 – Quadro *Axes Directions* do evento 2 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 06 h de 13 de maio de 2018 às 14 h de 13 de maio de 2018.



FONTE: do Autor.

Figura 49 – Quadro *MVA Hodogram* do evento 2 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 06 h de 13 de maio de 2018 às 14 h de 13 de maio de 2018.



FONTE: do Autor.

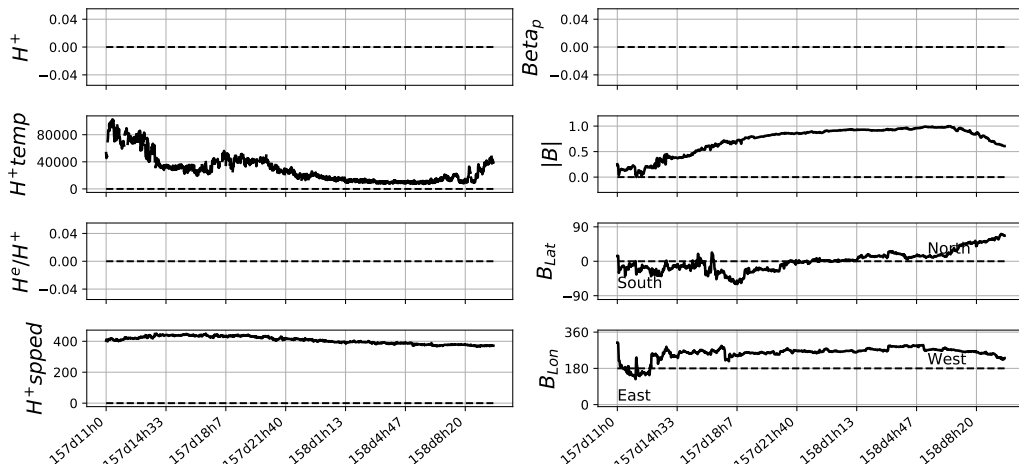
Figura 50 – Quadro *MVA Results* do evento 2 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 06 h de 13 de maio de 2018 às 14 h de 13 de maio de 2018.

MVA Output	MVA Validation	Results
$(\phi, \theta) = (68.00^\circ, 13.00^\circ)$		
$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (4.08, 2.32, 0.75)$	$\lambda_2/\lambda_3 = 3.089$ MVA consistent	Set 1: $(\phi_1, \theta_1) = (248^\circ, 13^\circ)$
\hat{x}_1 (GSE) = $(-0.250, -0.142, 0.958)$	$P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = 4.558$ MVA consistent	Set 2: $(\phi_2, \theta_2) = (248^\circ, -13^\circ)$
\hat{x}_2 (GSE) = $(0.360, 0.905, 0.228)$	$\chi = 70.09^\circ$ low angular rotation	Type and Hand: SWN and R
\hat{x}_3 (GSE) = $(0.899, -0.402, 0.175)$		

FONTE: do Autor.

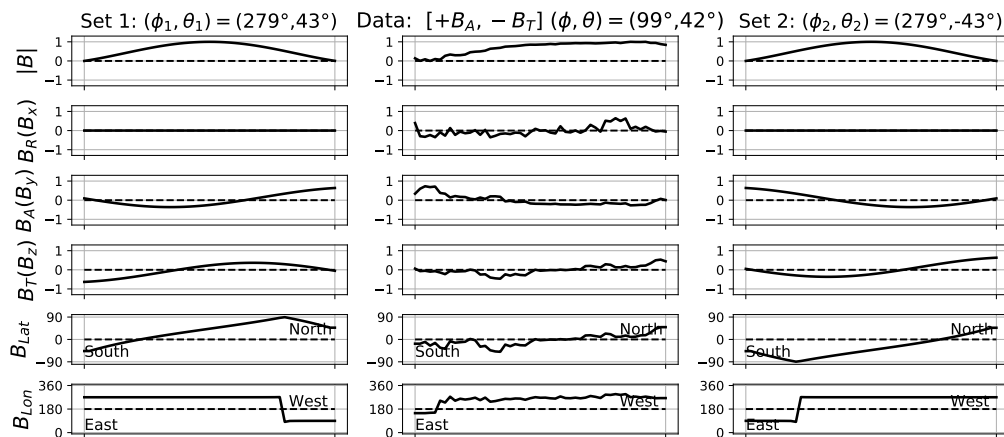
Evento 3 da Tabela 20

Figura 51 – Quadro *Data Set* do evento 3 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 11 h de 06 de junho de 2018 às 10 h de 07 de junho de 2018.



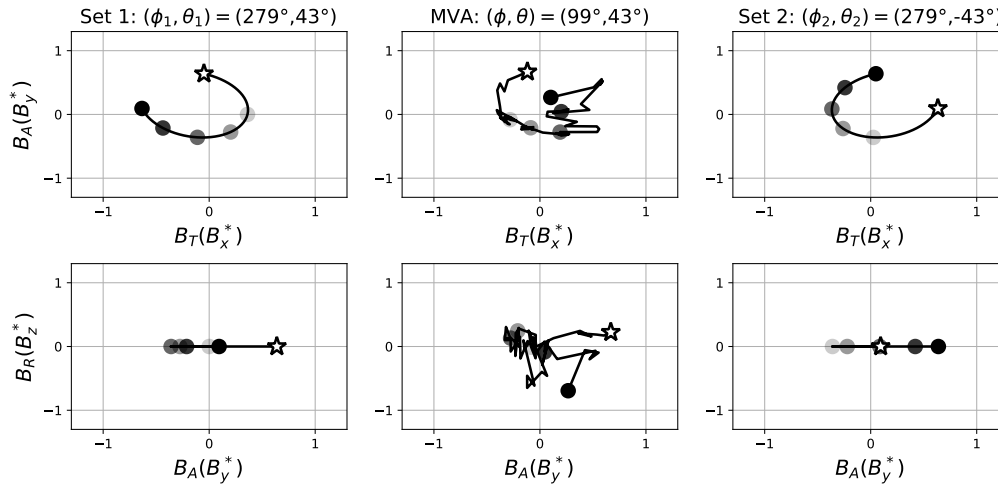
FONTE: do Autor.

Figura 52 – Quadro *Axes Directions* do evento 3 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 11 h de 06 de junho de 2018 às 10 h de 07 de junho de 2018.



FONTE: do Autor.

Figura 53 – Quadro *MVA Hodogram* do evento 3 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 11 h de 06 de junho de 2018 às 10 h de 07 de junho de 2018.



FONTE: do Autor.

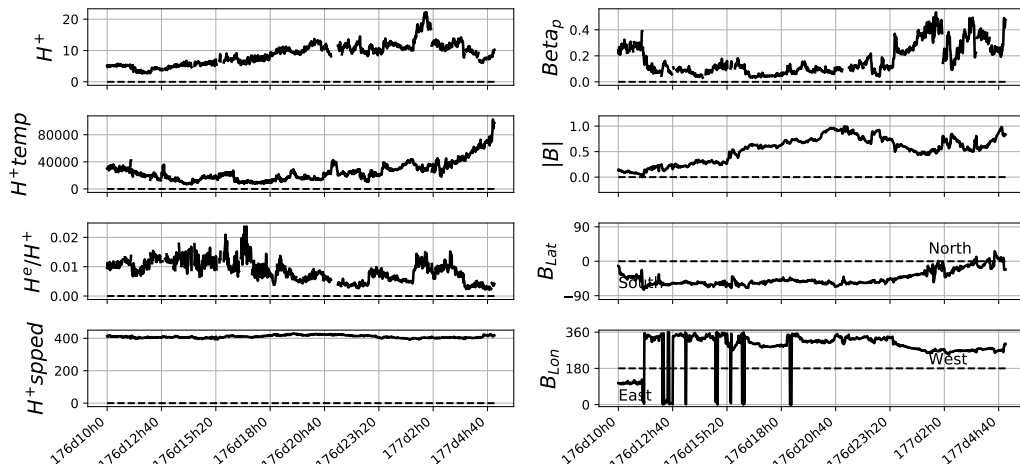
Figura 54 – Quadro *MVA Results* do evento 3 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 11 h de 06 de junho de 2018 às 10 h de 07 de junho de 2018.

MVA Output [+ B_A , - B_T]	MVA Validation	Results
$(\phi, \theta) = (99.40^\circ, 42.77^\circ)$		
$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (15.57, 9.90, 1.78)$	$\lambda_2/\lambda_3 = 5.556$ MVA consistent	Set 1: $(\phi_1, \theta_1) = (279^\circ, 43^\circ)$
\hat{x}_1 (GSE) = (-0.309, 0.623, -0.719)	$P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = 6.156$ MVA consistent	Set 2: $(\phi_2, \theta_2) = (279^\circ, -43^\circ)$
\hat{x}_2 (GSE) = (-0.120, 0.724, 0.679)	$\chi = 71.46^\circ$ low angular rotation	Type and Hand: SWN and R
\hat{x}_3 (GSE) = (0.944, 0.296, -0.149)		

FONTE: do Autor.

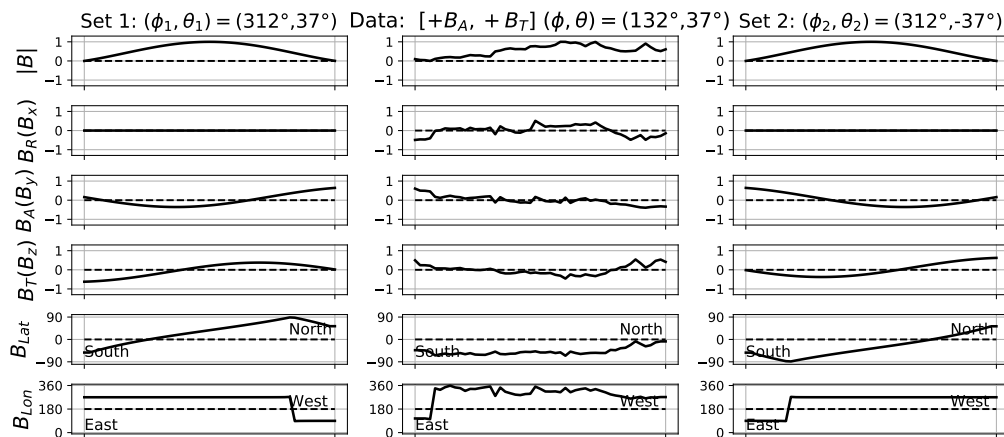
Evento 4 da Tabela 20

Figura 55 – Quadro *Data Set* do evento 4 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 10 h de 25 de junho de 2018 às 05 h de 26 de junho de 2018.



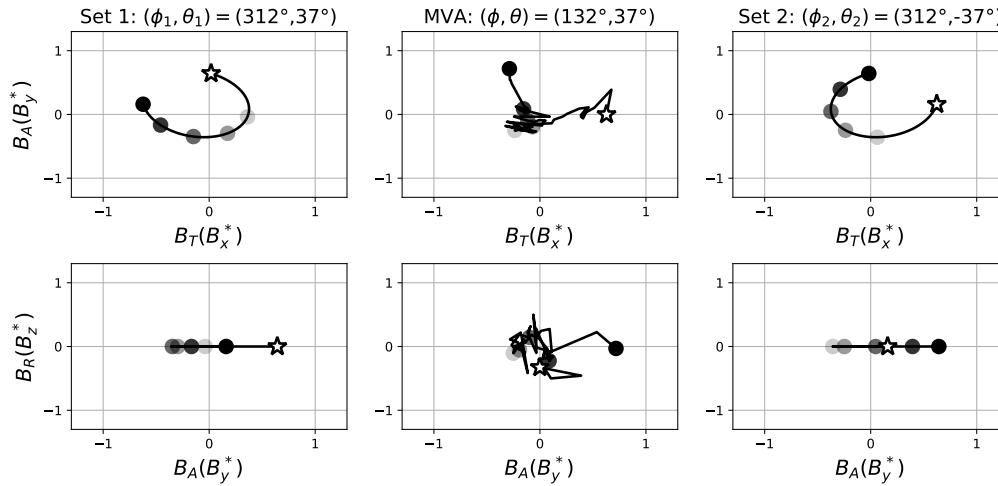
FONTE: do Autor.

Figura 56 – Quadro *Axes Directions* do evento 4 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 10 h de 25 de junho de 2018 às 05 h de 26 de junho de 2018.



FONTE: do Autor.

Figura 57 – Quadro *MVA Hodogram* do evento 4 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 10 h de 25 de junho de 2018 às 05 h de 26 de junho de 2018.



FONTE: do Autor.

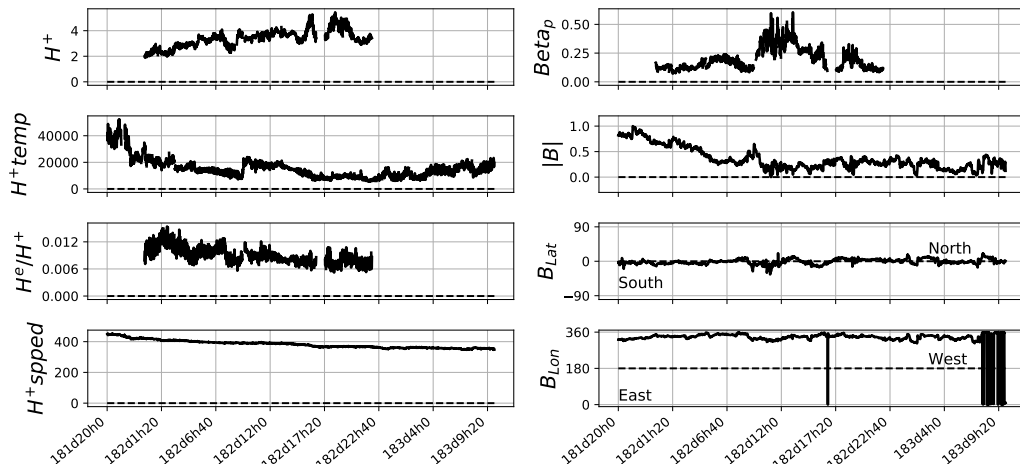
Figura 58 – Quadro *MVA Results* do evento 4 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 10 h de 25 de junho de 2018 às 05 h de 26 de junho de 2018.

MVA Output [+ B_A , + B_T]	MVA Validation	Results
$(\phi, \theta) = (132.34^\circ, 37.21^\circ)$		
$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (9.98, 4.80, 0.90)$	$\lambda_2/\lambda_3 = 5.368$ MVA consistent	Set 1: $(\phi_1, \theta_1) = (312^\circ, 37^\circ)$
\hat{x}_1 (GSE) = (-0.342, -0.807, 0.482)	$P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = 8.454$ MVA consistent	Set 2: $(\phi_2, \theta_2) = (312^\circ, -37^\circ)$
\hat{x}_2 (GSE) = (-0.536, 0.589, 0.605)	$\chi = 137.09^\circ$ large angular rotation	Type and Hand: SWN and R
\hat{x}_3 (GSE) = (-0.772, -0.052, -0.634)		

FONTE: do Autor.

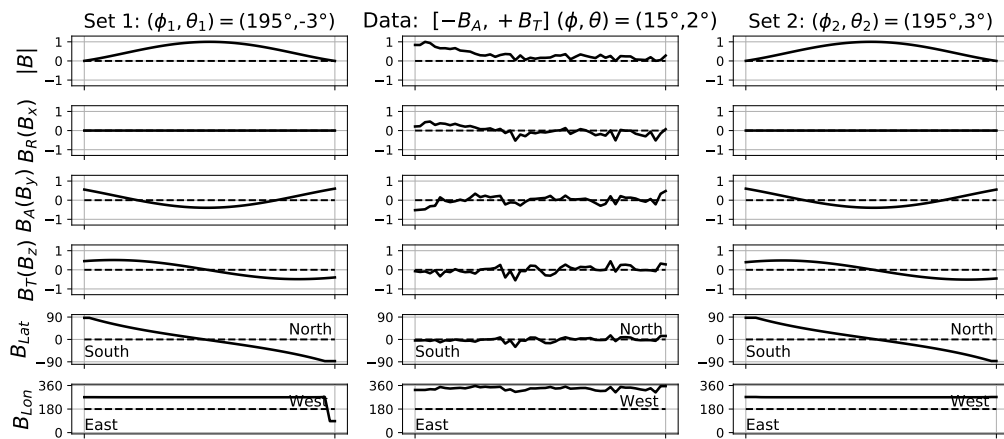
Evento 5 da Tabela 20

Figura 59 – Quadro *Data Set* do evento 5 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 20 h de 30 de junho de 2018 às 10 h de 02 de julho de 2018.



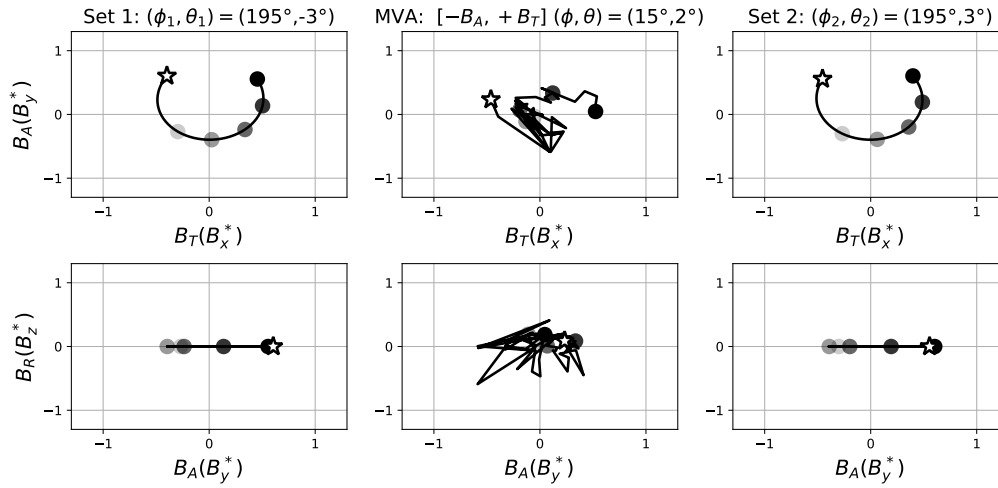
FONTE: do Autor.

Figura 60 – Quadro *Axes Directions* do evento 5 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 20 h de 30 de junho de 2018 às 10 h de 02 de junho de 2018.



FONTE: do Autor.

Figura 61 – Quadro *MVA Hodogram* do evento 5 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 20 h de 30 de junho de 2018 às 10 h de 02 de junho de 2018.



FONTE: do Autor.

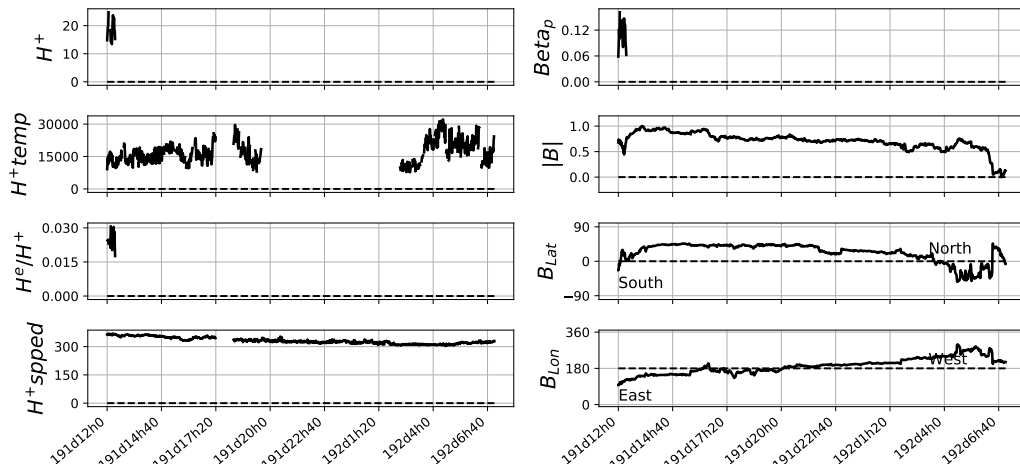
Figura 62 – Quadro *MVA Results* do evento 5 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 20 h de 30 de junho de 2018 às 10 h de 02 de junho de 2018.

MVA Output	MVA Validation	Results
$(\phi, \theta) = (195.00^\circ, -3.00^\circ)$		
$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (0.39, 0.29, 0.09)$	$\lambda_2/\lambda_3 = 3.257$ MVA consistent	Set 1: $(\phi_1, \theta_1) = (195^\circ, -3^\circ)$
\hat{x}_1 (GSE) = (0.266, -0.921, -0.284)	$P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = 2.761$ MVA inconsistent	Set 2: $(\phi_2, \theta_2) = (195^\circ, 3^\circ)$
\hat{x}_2 (GSE) = (-0.963, -0.263, -0.049)	$\chi = 50.58^\circ$ low angular rotation	Type and Hand: NWS and
\hat{x}_3 (GSE) = (0.029, -0.287, 0.958)		

FONTE: do Autor.

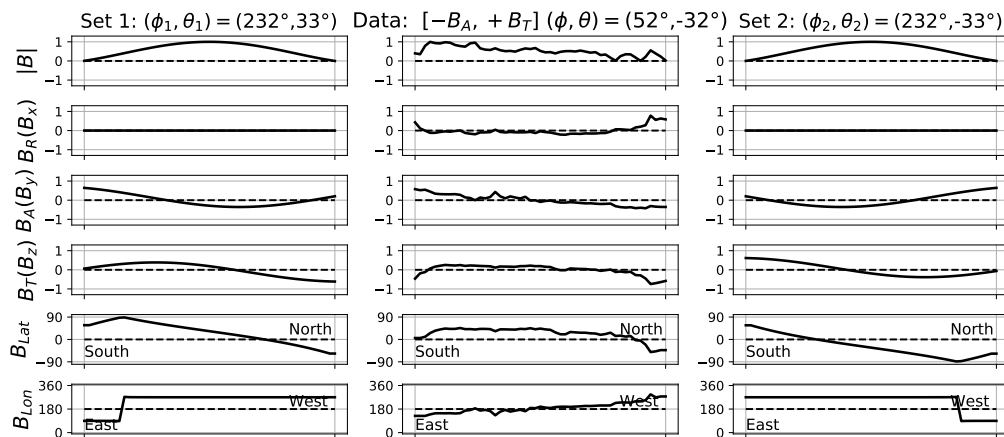
Evento 6 da Tabela 20

Figura 63 – Quadro *Data Set* do evento 6 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 12 h de 10 de julho de 2018 às 03 h de 11 de julho de 2018.



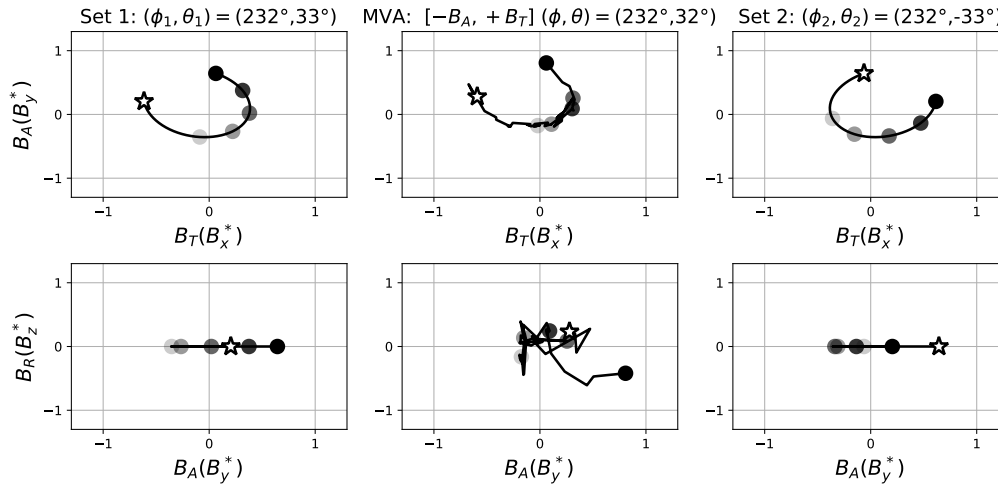
FONTE: do Autor.

Figura 64 – Quadro *Axes Directions* do evento 6 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 12 h de 10 de julho de 2018 às 03 h de 11 de julho de 2018.



FONTE: do Autor.

Figura 65 – Quadro *MVA Hodogram* do evento 6 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 12 h de 10 de julho de 2018 às 03 h de 11 de junho de 2018.



FONTE: do Autor.

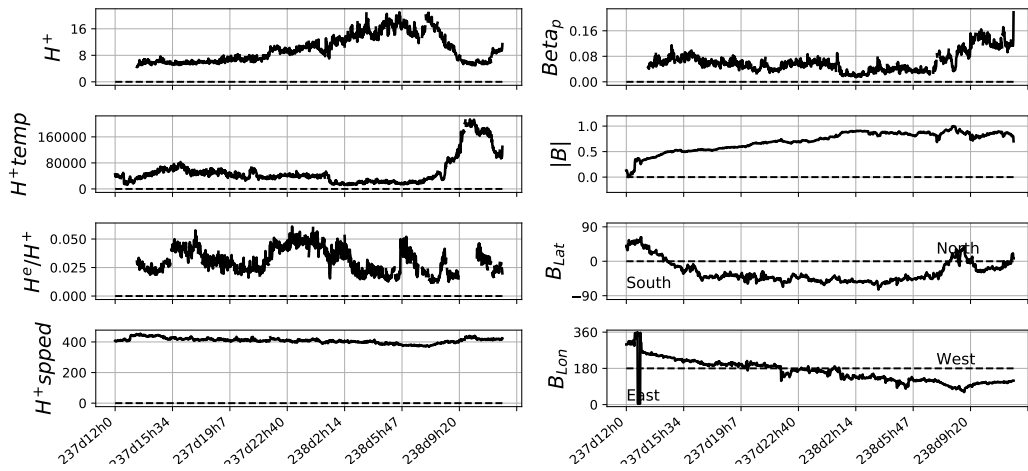
Figura 66 – Quadro *MVA Results* do evento 6 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 12 h de 10 de julho de 2018 às 03 h de 11 de julho de 2018.

MVA Output [$-B_A, +B_T$]	MVA Validation	Results
$(\phi, \theta) = (52.04^\circ, -32.94^\circ)$		
$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (27.12, 7.43, 0.81)$	$\lambda_2/\lambda_3 = 9.155$ MVA consistent	Set 1: $(\phi_1, \theta_1) = (232^\circ, 33^\circ)$
\hat{x}_1 (GSE) = $(-0.297, 0.734, 0.611)$	$P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = 13.811$ MVA consistent	Set 2: $(\phi_2, \theta_2) = (232^\circ, -33^\circ)$
\hat{x}_2 (GSE) = $(0.516, 0.662, -0.544)$	$\chi = 104.15^\circ$ large angular rotation	Type and Hand: NWS and
\hat{x}_3 (GSE) = $(0.803, -0.154, 0.576)$		

FONTE: do Autor.

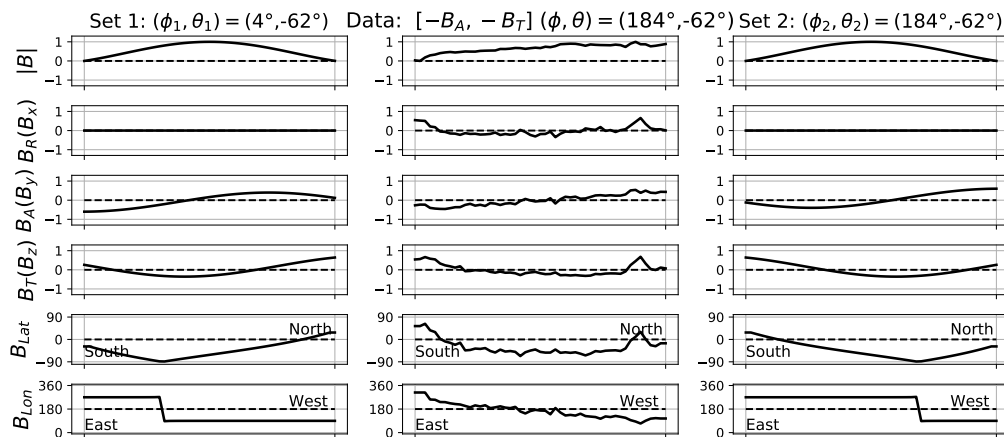
Evento 7 da Tabela 20

Figura 67 – Quadro *Data Set* do evento 7 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 12 h de 25 de agosto de 2018 às 12 h de 26 de agosto de 2018.



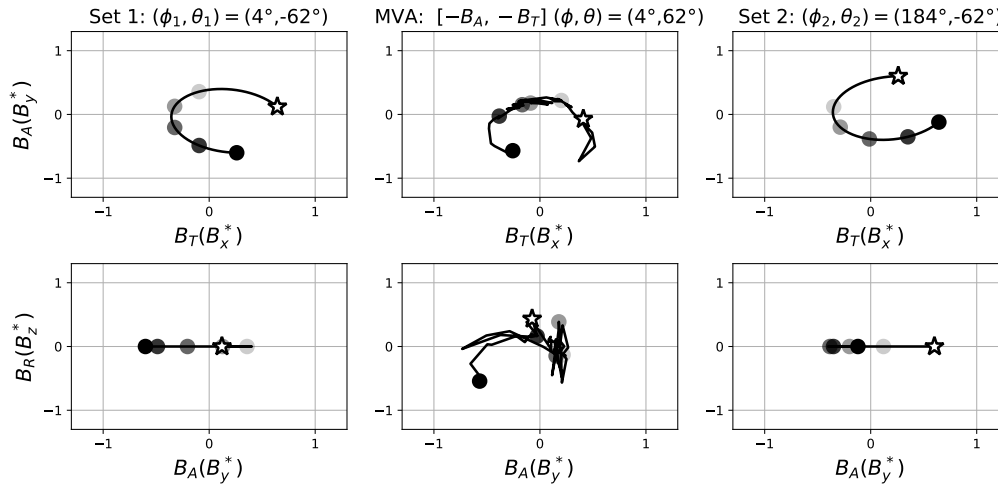
FONTE: do Autor.

Figura 68 – Quadro *Axes Directions* do evento 7 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 12 h de 25 de agosto de 2018 às 12 h de 26 de agosto de 2018.



FONTE: do Autor.

Figura 69 – Quadro *MVA Hodogram* do evento 7 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 12 h de 25 de agosto de 2018 às 12 h de 26 de agosto de 2018.



FONTE: do Autor.

Figura 70 – Quadro *MVA Results* do evento 7 da Tabela 20 catalogado nesta pesquisa. O evento ocorreu no período: 12 h de 25 de agosto de 2018 às 12 h de 26 de agosto de 2018.

MVA Output [$-B_A, -B_T$]	MVA Validation	Results
$(\phi, \theta) = (184.25^\circ, -62.32^\circ)$		
$(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = (77.20, 50.37, 4.94)$	$\lambda_2/\lambda_3 = 10.195$ MVA consistent	Set 1: $(\phi_1, \theta_1) = (4^\circ, -62^\circ)$
\hat{x}_1 (GSE) = $(-0.187, -0.973, 0.135)$	$P(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = 7.969$ MVA consistent	Set 2: $(\phi_2, \theta_2) = (184^\circ, -62^\circ)$
\hat{x}_2 (GSE) = $(-0.463, -0.034, -0.886)$	$\chi = 123.87^\circ$ large angular rotation	Type and Hand: WSE and L
\hat{x}_3 (GSE) = $(0.866, -0.228, -0.444)$		

FONTE: do Autor.

APÊNDICE D – Atividades e produção científica

D.1 Publicações

- **OLIVEIRA, R.A.R.**, Oliveira, M.W.S., Ojeda-González, A., De La Luz, V. New Metric for Minimum Variance Analysis Validation in the Study of Interplanetary Magnetic Clouds, *Solar Phys.*, v. 295, n. 3, p. 45, mar. 2020. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11207-020-01610-6>.
- **OLIVEIRA, R.A.R.**, Ojeda-González, A., Degeneração na análise de componentes principais: Caracterização geométrica, In: VII SIMPÓSIO DE FÍSICA E ASTRONOMIA DO VALE DO PARAÍBA - SIMFAST, n. 7, 2019, São José dos Campos-SP, Apresentação Oral.
- **OLIVEIRA, R.A.R.** Caracterização da ocorrência de nuvens magnéticas, In: V SIMPÓSIO DE FÍSICA E ASTRONOMIA DO VALE DO PARAÍBA - SIMFAST, n. 5, 2017, São José dos Campos-SP, Apresentação Oral, https://www1.univap.br/simfast/simfast_5/.
- **OLIVEIRA, R.A.R.**, Ojeda-González, A., Oliveira, M.W.S. Aplicação do modelo livre de força para estudo de nuvens magnéticas interplanetárias, In: XXXVII CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL - CNMAC, n. 37, 2017, São José dos Campos-SP, Apresentação Pôster, **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v. 6, n. 1, 2018, <https://proceedings.sbmac.org.br/sbmac/article/view/1916>.
- Santos, S.P., Souza, R. P., **OLIVEIRA, R.A.R.**, Ojeda-González, A., Oliveira, M.W.S. Caracterização geométrica do espaço de variância de campos magnéticos de nuvens magnéticas usando análise de componentes principais, In: XXXVIII CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL - CNMAC, n. 38, 2018, Campinas-SP, Apresentação Pôster, **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v. 6, n. 2, 2018, <https://proceedings.sbmac.org.br/sbmac/article/view/2616>.
- Santos, S.P., Souza, R. P., **OLIVEIRA, R.A.R.**, Ojeda-González, A., Oliveira, M.W.S. Caracterização geométrica do espaço de variância de campos magnéticos

de nuvens magnéticas usando análise de componentes principais, In: IV JORNADA CIENTÍFICA E IV SEMINÁRIO DE PROJETOS E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA – IFSP, n. 4, 2018, São José dos Campos-SP, Apresentação Pôster.

- OLIVEIRA, M. W. S., **OLIVEIRA, R. A. R.**, OJEDA GONZÁLEZ, A., PILLAT, V. G., Application for correction of the variance analysis in the magnetic clouds study. In: VIII SBGEA & VIII SimFAST, 2021, SAO JOSE DOS CAMPOS. Abstract book - VIII SBGEA & VIII SimFAST, 2021. v. 1. p. 117-117.
- **OLIVEIRA, R. A. R.**, OLIVEIRA, M. W. S., OJEDA GONZÁLEZ, A., PILLAT, V. G. New Metric for Minimum Variance Analysis Validation in the Study of Interplanetary Magnetic Clouds. In: VIII SBGEA & VIII SimFAST, 2021, SAO JOSE DOS CAMPOS. Abstract book - VIII SBGEA & VIII SimFAST. SAO JOSE DOS CAMPOS: UNIVAP, 2021. v. 1. p. 326-326.
- OJEDA GONZÁLEZ, A., CARDOSO, M. V. C., SOUZA, M. G. A., **OLIVEIRA, R. A. R.**, KLAUSNER, V., PRESTES, A., ECHER, E., MENDES, ODIM, OLIVEIRA, M. W. S. . Apresentação de um método para identificar intervalos longos de alta alfvénicidade no vento solar. In: VIII SBGEA & VIII SimFAST, 2021, SAO JOSE DOS CAMPOS. Abstract book - VIII SBGEA & VIII SimFAST, 2021. v. 1. p. 110-110.

D.2 Trabalhos em redação

- **OLIVEIRA, R.A.R.**, Oliveira, M.W.S., Ojeda-González, A., Pillat, V.G., Echer, E., Nieves-Chinchilla, T. Resolving the ambiguity of magnetic cloud's orientation caused by MVA comparing it with the force-free model, *Solar Phys.*, 2021.
- Oliveira, M.W.S., Diniz, M. Caritá, L. **OLIVEIRA, R.A.R.**, da Silva, F. A., Silva, G. T., Ferreira, I. A. Intelligent image-based colorimetric tests for evaluation of peracetic acid concentration, *Sensors and Actuators B: Chemical.*, 2021.

D.3 Outras atividades realizadas durante o Doutorado

Disciplinas cursadas:

2º Semestre de 2016

- Orientação I (Prof.Dr.Oli L. Dors Junior)
- Física Espacial I (Prof.Dr. Arian O. Gonzalez, Prof.Dr. Márcio Muella, Prof.Dr. Alan Prestes)

- Seminários em Física e Astronomia II (Prof.Dr. Francisco C. R. Fernandes)
- Introdução à Computação Científica (Prof.Dr. Valdir G. Pillat)

1º Semestre de 2017

- Orientação II (Prof.Dr.Oli L. Dors Junior)
- Eletrodinâmica (Prof.Dr.Sérgio Pilling)
- Tópicos Especiais em Física Espacial (Prof.Dr.Arian O. González)

Seminários apresentados nas disciplinas cursadas:

2º Semestre de 2016

- Aplicação do modelo livre de força para estudo das nuvens magnéticas interplanetárias (Introdução à Computação Científica, UNIVAP)
- Aplicação do modelo livre de força para estudo das nuvens magnéticas (Seminários II, UNIVAP)
- Aplicação do modelo livre de força para estudo das nuvens magnéticas interplanetárias (Física Espacial I, UNIVAP)

Disciplinas aproveitadas:

- Seminários (cf. histórico do IBILCE/UNESP)
- Métodos Matemáticos e Análise de Sinais (cf. histórico do IBILCE/UNESP)
- Mecânica Quântica (cf. histórico do IBILCE/UNESP)

Atividades Extras:

Ano 2016

- Oficina oferecida na Semana Nacional de Ciência e Tecnologia: O Algeplan como Recurso Didático na Exploração de Expressões Algébricas e Fatoração – IFSP- São José dos Campos – SP.

Ano 2017

- Oficina oferecida na Semana Nacional de Ciência e Tecnologia: Dominó das 4 cores – IFSP- São José dos Campos – SP.

Ano 2018

- Coorientação de Iniciação Científica (PIBIFSP2018): Caracterização de espaços vetoriais usando análise de componentes principais – Aluna: Sarah Paula dos Santos – Instituto Federal de São Paulo – IFSP – São José dos Campos – SP.
- Licença Maternidade (Julho a Outubro) Nascimento do meu filho Jorge Rosa Oliveira em 29/06/2018.

Ano 2019

- Pesquisadora voluntária em projeto de pesquisa: Desenvolvimento de sistema de visão computacional para interpretação de fitas para detecção de concentração de saneante. Parceria entre grupo de pesquisa GPMCC, IFSP-SJC, FACTO e empresa Resix - vigência 2020-2021.
- Comitê Editorial do VII Simpósio de Física e Astronomia do Vale do Paraíba (SimFAST) – UNIVAP.

Ano 2020

- Pesquisadora voluntária em projeto de pesquisa: Desenvolvimento de sistema de visão computacional para interpretação de fitas para detecção de concentração de saneante, em parceria entre grupo de pesquisa GPMCC, IFSP-SJC, FACTO e empresa Resix - vigência do contrato 2020-2021.

Ano 2021

- Comitê Editorial do VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia (SBGEA) VIII Simpósio de Física e Astronomia do Vale do Paraíba (SimFAST) – UNIVAP
- Coorientação de Iniciação Científica (PIBIFSP2021): Construção de algoritmos de aprendizado de máquina a partir em competições *on-line* – Aluna: Bárbara Marques – Instituto Federal de São Paulo – IFSP – São José dos Campos – SP.
- Coorientação de Iniciação Científica (PIBIFSP2021): Doce estatística: análise da distribuição de cores do confeito *M&M*[®] utilizando Python – Aluno: Matheus Costa de Souza – Instituto Federal de São Paulo – IFSP – São José dos Campos – SP.