



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

## **VARIABILIDADE SAZONAL DO OZÔNIO ESTRATOSFÉRICO E SUA RELAÇÃO COM A PRECIPITAÇÃO DE PARTÍCULAS SOBRE A ANOMALIA MAGNÉTICA DA AMÉRICA DO SUL**

Geisiane da Rocha Sarmento

Relatório do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), orientado pela Dra. Ligia Alves da Silva, com co-orientação do Dr. Cristiano Max Wrasse e Dr. Lucas Vaz Peres.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder força, sabedoria e resiliência ao longo desta jornada.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), sou profundamente grato pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa em um ambiente de excelência e pelo apoio financeiro.

Expresso minha sincera gratidão à minha orientadora, Dra. Ligia Alves da Silva, cujo conhecimento, paciência e orientação foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Também agradeço ao meu professor Dr. Lucas Vaz Peres, e ao Dr. Cristiano Max Wrasse por suas contribuições valiosas as quais ajudaram a moldar este estudo.

Finalmente, agradeço à minha família, principalmente aos meus pais, pelo apoio incondicional, compreensão e encorajamento ao longo de todo o processo. Este trabalho é tão deles quanto meu.

## RESUMO

A distribuição do ozônio estratosférico sobre a região da Anomalia Magnética da América do Sul (SAMA) apresenta uma diminuição significativa, especificamente nas latitudes médias e altas. Contudo, diversos fatores podem contribuir para tal diminuição, inclusive a ação antrópica e as reações químicas entre os elétrons precipitantes e as famílias de NO<sub>x</sub> e HO<sub>x</sub>. Neste trabalho, o foco está nos impactos causados no ozônio através da influência de elétrons precipitantes. Portanto, nesse segundo ano de trabalho foi realizada pesquisa referente aos mecanismos de aprisionamento de elétrons de alta (MeV) e baixa (keV) energia nos cinturões de radiação de Van Allen. Para isto, foram utilizados os dados da missão Van Allen, como, os fluxos de elétrons nos cinturões de radiação e as atividades de ondas magnetosféricas, uma vez que, os elétrons precipitantes são oriundos destes cinturões. Na região auroral, as partículas precipitantes são oriundas do cinturão externo (3,5-6.5 RE), enquanto na região da SAMA, são oriundas do cinturão interno (1-2 RE). Um dos principais processos físicos responsáveis por causar precipitação de elétrons na atmosfera, ocorre a partir de interação ressonante entre ondas magnetosféricas e partículas. Então, utilizando a plataforma disponível pela Johns Hopkins University - Applied Physics Laboratory em: <https://rbsp-gway.jhuapl.edu/>, foram selecionados 3 eventos durante ocorrências de variabilidades no fluxo de elétrons aprisionados nos cinturões de radiação, para assim, analisar a presença de ondas magnetosféricas, como as ondas hiss e as magnetossônicas (MS). A relação entre a atividade de ondas magnetosféricas no cinturão interno e a diminuição de ozônio estratosférico no centro da SAMA, pode ser utilizada para inferir a provável precipitação nesta região. Os resultados obtidos neste segundo ano, mostra que para os eventos selecionados, ocorreu atividade de ondas hiss e MS, as quais são capazes de causar precipitação de elétrons na atmosfera, desde a estratosfera até a mesosfera sobre a região da SAMA. Por fim, foi observada uma resposta significativa principalmente no ozônio estratosférico na SAMA quando comparado com a climatologia.

Palavras-chave: SAMA; ondas magnetossônicas; ozônio; ondas hiss; cinturão interno.

## ABSTRACT

The distribution of stratospheric ozone over the South American Magnetic Anomaly (SAMA) region shows a significant decrease, specifically in the middle and high latitudes. However, several factors can contribute to this decrease, including anthropogenic action and chemical reactions between precipitating electrons and the NO<sub>x</sub> and HO<sub>x</sub> families. In this work, the focus is on the impacts on ozone caused by the influence of precipitating electrons. Therefore, in this second year of work, research was carried out into the trapping mechanisms of high (MeV) and low (keV) energy electrons in the Van Allen radiation belts. To do this, we used data from the Van Allen mission, such as electron fluxes in the radiation belts and magnetospheric wave activity, since the precipitating electrons come from these belts. In the auroral region, the precipitating particles come from the outer belt (3.5-6.5 RE), while in the SAMA region, they come from the inner belt (1-2 RE). One of the main physical processes responsible for causing electrons to precipitate in the atmosphere is the resonant interaction between magnetospheric waves and particles. So, using the platform available at Johns Hopkins University - Applied Physics Laboratory at: <https://rbspgway.jhuapl.edu/>, 3 events were selected during occurrences of variability in the flow of electrons trapped in the radiation belts, in order to analyze the presence of magnetospheric waves, such as hiss waves and magnetosonic waves (MS). The relationship between magnetospheric wave activity in the inner belt and the decrease in stratospheric ozone in the center of SAMA can be used to infer the likely precipitation in this region. The results obtained in this second year show that for the events selected, hiss and MS wave activity occurred, in which are capable of causing electron precipitation in the atmosphere, from the stratosphere to the mesosphere over the SAMA region. Finally, a significant response principally in stratospheric ozone was observed over the SAMA when compared with a climatology

Keywords: SAMA; magnetosonic waves; ozone; hiss waves; inner belt.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação artística do Cinturão de Van Allen.....	9
Figura 2 - Região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (SAMA). ....	10
Figura 3 - Representação ilustrativa das camadas atmosféricas. ....	11
Figura 4 - Sondas Van Allen. ....	12
Figura 5 - Seleção dos eventos por meio do fluxo de elétrons com energia de 2,30 MeV em função de L- Shell (eixo vertical) e tempo (eixo horizontal) através da plataforma rPlot para o primeiro evento. Os fluxos de elétrons são obtidos pelo instrumento REPT.....	13
Figura 6 - Gráfico da projeção mapeada da órbita da Sonda Van Allen através da plataforma SSCWeb .....	14
Figura 7 - Gráfico da órbita da Sonda Van Allen através da plataforma SSCWeb. ....	14
Figura 8 - Densidade espectral de potências de ondas hiss e magnetosônica na região da plasmapausa. Os espectrogramas de campo magnético são obtidos pelo instrumento EMFISIS a bordo das sondas Van Allen A (Evento 1 - 23 de setembro de 2015).....	15
Figura 9 - Densidade espectral de potências de ondas hiss e magnetosônica na região da plasmapausa. Os espectrogramas de campo magnético são obtidos pelo instrumento EMFISIS a bordo das sondas Van Allen A (Evento 2 - 20 de julho de 2016).....	16
Figura 10 - Densidade espectral de potências de ondas hiss e magnetosônica na região da plasmapausa. Os espectrogramas de campo magnético são obtidos pelo instrumento EMFISIS a bordo das sondas Van Allen A (Evento 3 - 18 de abril de 2017).....	16
Figura 11 - Espectrograma de Elipticidade da polarização do campo magnético obtido pelo instrumento EMFISIS a bordo da sonda Van Allen A (Evento 1 no dia 20 de julho de 2016) .....	17
Figura 12 - Espectrograma de elipticidade da polarização do campo magnético obtido pelo instrumento EMFISIS a bordo da sonda Van Allen A (Evento 2 no dia 23 de julho de 2015). ....	18
Figura 13 - Espectrograma de elipticidade da polarização do campo magnético obtido pelo instrumento EMFISIS a bordo da sonda Van Allen A (evento 3 no dia 18 de abril de 2017).....	18
Figura 14 - Espectrograma de planaridade da polarização do campo magnético	

obtido pelo instrumento EMFISIS a bordo do a bordo das sondas Van Allen A (Evento 1 no dia 23 de julho de 2015).....	19
Figura 15 - Espectrograma de planaridade da polarização do campo magnético obtido pelo instrumento EMFISIS a bordo do a bordo das sondas Van Allen A (Evento 2 no dia 20 de julho de 2016).....	20
Figura 16 - Espectrograma de planaridade da polarização do campo magnético obtido pelo instrumento EMFISIS a bordo do a bordo das sondas Van Allen A (Evento 3 no dia 18 de abril de 2017).....	21
Figura 17 - a) Perfil da coluna total de ozônio comparando a climatologia (linha preta) com o evento analisado (linha vermelha) e (b) Diferença entre o evento e a climatologia (Evento 1 - 23 de julho de 2015).....	21
Figura 18 - a) Perfil da coluna total de ozônio comparando a climatologia (linha preta) com o evento analisado (linha vermelha) e (b) Diferença entre o evento e a climatologia (Evento 2 - 20 de julho de 2016).....	22
Figura 19 - a) Perfil da coluna total de ozônio comparando a climatologia (linha preta) com o evento analisado (linha vermelha) e (b) Diferença entre o evento e a climatologia (Evento 3 - 18 de abril de 2017). .....	22

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

SAMA	Anomalia Magnética da América do Sul
EMFISIS	Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science,
MLS	Microwave Limb Sounder
fce	Frequência ciclotrônica do elétron
ELF	Frequência extremamente baixa
fLHR	Frequência de ressonância híbrida
fcp	inferior Frequência local do próton
wpe	Frequência do plasma
wce	Frequência ciclotrônica do elétron
RBSP	Radiation Belt Storm Probes
SPDF	Space Physics Data Facility

## SUMÁRIO

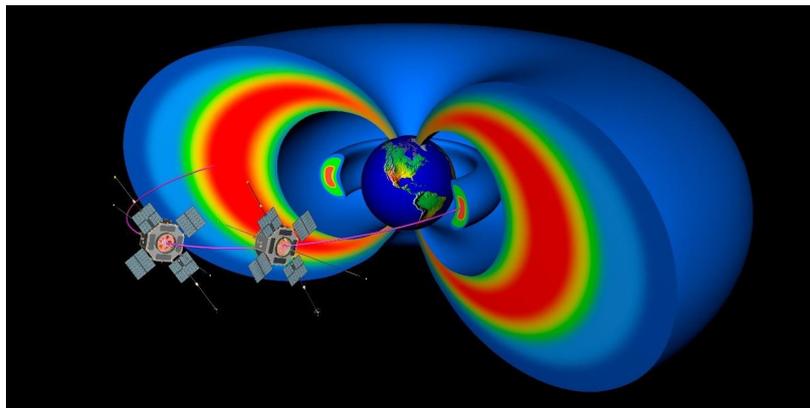
1. INTRODUÇÃO .....	9
1.1 Cinturão de Van Allen .....	9
1.2 Ondas Hiss e Magnetossônicas .....	9
1.3. SAMA.....	10
1.4 Camadas Atmosféricas .....	10
1.5 Ozônio.....	11
2. OBJETIVO GERAL .....	11
3. DADOS E METODOLOGIA .....	11
3.1 Instrumentação e Dados .....	12
3.2 Metodologia .....	13
4 RESULTADOS.....	15
4.1 Ondas Hiss e Magnetossônicas .....	15
4.2 Elipicidade e Planaridade .....	17
4.3 Ozônio.....	21
5 CONCLUSÃO .....	23
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	23

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Cinturões de Van Allen

Os Cinturões de Van Allen (Figura 1) são regiões de partículas carregadas, prótons e elétrons, as quais ficam presas pelo campo magnético dipolar da Terra. Descobertos em 1958 pelo cientista James Van Allen, os cinturões de radiação tem grande importância para o estudo do clima espacial. O cinturão interno contém maior concentração de prótons energéticos, enquanto o cinturão externo, predominam elétrons de alta energia. Estes atuam como uma barreira protetora contra partículas oriundas dos raios cósmicos galácticos e da radiação solar intensa. Assim, a dinâmica dos cinturões de radiação representa um desafio para a área espacial devido aos efeitos danosos dessa radiação em equipamentos eletrônicos e seres humanos a bordo de plataformas espaciais.

Figura 1 - Representação artística do Cinturão de Van Allen.



Fonte: JHU/APL, NASA.

Os cinturões de radiação de Van Allen, consistem em populações relativísticas de elétrons e prótons aprisionados no campo magnético da Terra. Os altos fluxos de partículas aprisionadas foram identificados pela saturação nos contadores Geiger a bordo do satélite Explorer 1 (Van Allen et al., 1958).

### 1.2 Ondas Hiss e Magnetosônicas (MS)

As ondas Hiss no modo assobiador e Magnetosônicas (MS) são tipos distintos de ondas eletromagnéticas que desempenham um papel crucial na dinâmica do ambiente espacial próximo à Terra, particularmente na região do cinturão de radiação interno e região do slot (vazio). As ondas Hiss são ondas plasmasséricas (Bortnik et al., 2008) e desempenham um papel importante na dispersão e perda de elétrons (0,1 keV até poucas dezenas de keV) do cinturão

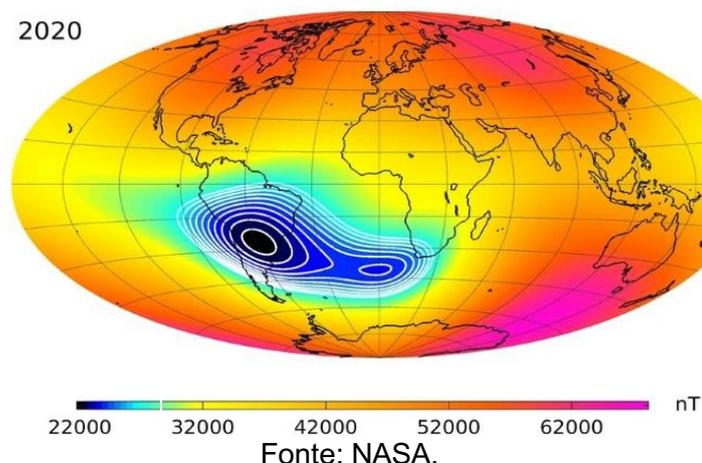
interno para a atmosfera (Da Silva et al., 2022). Enquanto as ondas Magnetosônicas são geradas na região do equador magnético da Terra, onde podem influenciar tanto na aceleração de partículas nos cinturões de radiação, quando está fora da plasmasfera, quanto na dispersão de elétrons (dezenas a centenas de keV) do cinturão interno para a atmosfera.

As ondas Hiss são emissões eletromagnéticas de banda larga, sem estrutura, de frequência extremamente baixa (ELF), que ocorre na faixa de frequências de ~100 Hz a vários kHz, e apresenta grande importância como mecanismo de dispersão dominante para os elétrons aprisionados no cinturão interno (Nigel et al., 2006).

### 1.3. SAMA

A Anomalia Magnética do Atlântico Sul (SAMA) é uma região no campo magnético terrestre localizada na região centro-sul da América do Sul (Figura 2), onde a intensidade do campo magnético é significativamente mais fraca que em outras áreas do planeta. Essa anomalia permite que partículas carregadas, provenientes do cinturão interno de Van Allen, se aproximem mais da Terra, aumentando a exposição à radiação nessa região.

Figura 2 - Região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (SAMA).

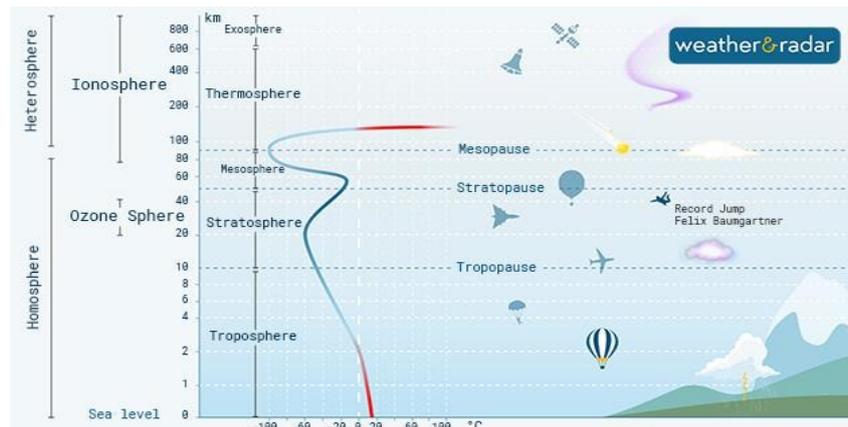


### 1.4 Camadas Atmosféricas

A atmosfera terrestre (Figura 3) é composta por diferentes camadas, cada uma com características físicas e químicas distintas, que desempenham papéis essenciais na regulação do clima e na proteção da vida no planeta. A Troposfera

(0~10Km) abriga os fenômenos meteorológicos, em seguida a Estratosfera (10~50Km) contendo a camada de ozônio. Acima, a Mesosfera (50~90Km) caracterizada pelo seu abrupto resfriamento, a Termosfera (acima de 90Km) interagindo com a radiação solar e, por fim a Exosfera se dissipando no espaço.

Figura 3 - Representação ilustrativa das camadas atmosféricas.



Fonte: Weather&Radar.

## 1.5 Ozônio

O gás Ozônio (O<sub>3</sub>) é o principal gás traço presente na estratosfera terrestre, sendo essencial para a vida no planeta Terra. O mesmo, desempenha um papel fundamental na manutenção da vida na Terra tal como se conhece, absorvendo assim, a radiação UV (ultravioleta), nocivas aos seres vivos (Sauby, 1996).

O Ozônio é uma molécula constituída por três átomos de oxigênio, o qual tem a capacidade de absorver a radiação ultravioleta, liberando energia na forma de calor, conseqüentemente, a temperatura começa a aumentar com a altura na região da estratosfera, onde se tem a maior concentração desse gás (Slusser, 1999). Contudo, especificamente no centro da SAMA, a distribuição do ozônio estratosférico apresenta uma diminuição quando comparado com outras regiões do globo terrestre de mesma latitude. Tal diminuição atribui-se a precipitação de elétrons oriundos do cinturão de radiação interno.

## 2. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste projeto é entender a variabilidade sazonal do ozônio sobre a SAMA e sua relação com a precipitação de elétrons oriundos do cinturão interno de radiação.

## 3. DADOS E METODOLOGIA

### 3.1 Instrumentação e Dados

A missão Van Allen Probes da NASA (anteriormente conhecida como Radiation Belt Storm Probes, ou RBSP) aborda a forma como as partículas carregadas de alta energia são aprisionadas, variam e evoluem em ambientes espaciais, e, especificamente, nos cinturões de radiação da Terra. As sondas (Figura 4) foram lançadas em 30 de agosto de 2012 e entraram na fase científica em 1 de novembro de 2012, atingindo todos os seus requisitos em 31 de outubro de 2014 (Adams et. al., 2016).

Figura 4 - Sondas Van Allen.



Fonte: JHU/APL, NASA.

Para o estudo da atividade de ondas na magnetosfera interna, como as ondas hiss no modo assobiador e magnetossônicas, fez-se necessário calcular a potência espectral do campo magnético, fornecida pelo instrumento Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS) (Kletzing et al., 2013), a bordo das sondas Van Allen A e B (Mauk et al., 2012).

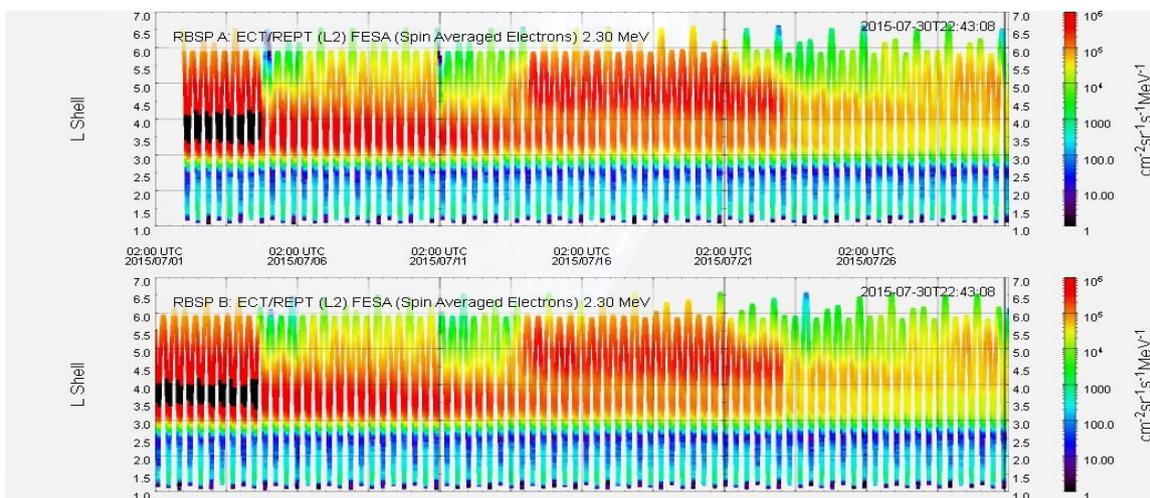
O impacto da precipitação de elétrons foi analisado a partir da obtenção da coluna total de ozônio na região da SAMA com coordenadas centrais lat 25°S e 47.5° W (sendo InfLat=-30°S, SupLat=-20°S; InfLon=-53°W e SupLon=-42°W). Os dados foram fornecidos a partir do satélite MLS (Microwave Limb Sounder), um dos quatro instrumentos do satélite EOS (Earth Observing System) Aura da NASA, lançado em 15 de julho de 2004. O MLS faz medições da composição, temperatura, umidade e gelo de nuvens que são necessárias para rastrear a

estabilidade da camada de ozônio estratosférico. O MLS observa a emissão térmica de microondas do "limbo" da Terra (a borda da atmosfera atmosférica) olhando para a frente ao longo da direção de voo da espaçonave Aura, escaneando sua visão do solo para ~90 km a cada ~25 segundos.

### 3.2 Metodologia

A metodologia empregada neste trabalho inicia com os critérios de seleção dos eventos, os quais devem obedecer ao critério de detecção de variabilidade no fluxo de elétrons de alta energia no cinturão externo de radiação. Portanto, foram selecionados 10 eventos, em ordem cronológica, ao longo da era Van Allen (o período de outubro de 2012 a janeiro de 2019), no canal 2,30 MeV, através da plataforma rPlot (Figura 5) (<https://rbspgway.jhuapl.edu/rPlotTime?context>) para a identificação da variabilidade do fluxo de elétrons.

Figura 5 - Seleção dos eventos por meio do fluxo de elétrons com energia de 2,30 MeV em função de L- Shell (eixo vertical) e tempo (eixo horizontal) através da plataforma rPlot para o primeiro evento. Os fluxos de elétrons são obtidos pelo instrumento REPT.



Fonte: Autor (2025).

Após a seleção dos eventos, utilizou-se o Space Physics Data Facility (SPDF), um serviço de dados multimissão que oferece as informações de órbita dos satélites (SSCWeb) para expressar graficamente a projeção mapeada (Figura 6) e a órbita (Figura 7) das Sondas Van Allen.

Figura 6 - Gráfico da projeção mapeada da órbita da Sonda Van Allen através da plataforma SSCWeb

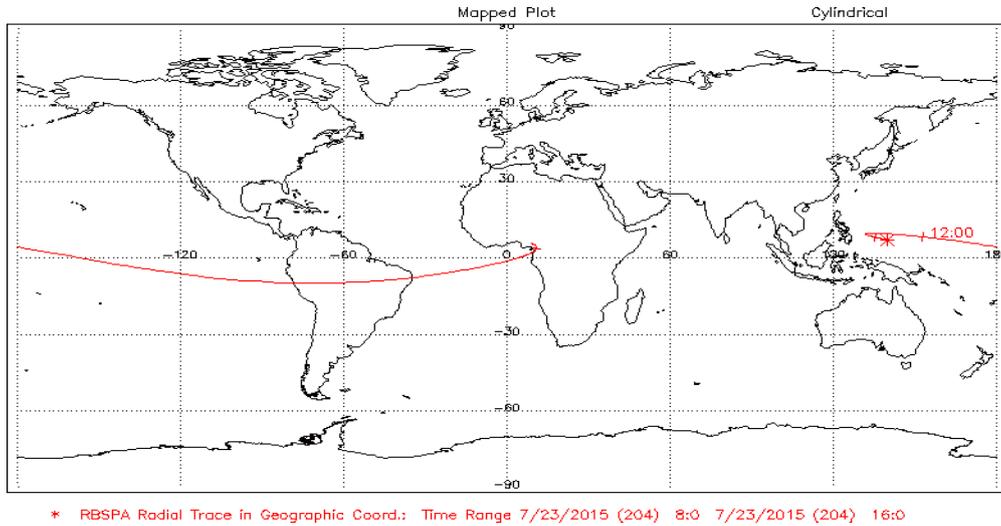
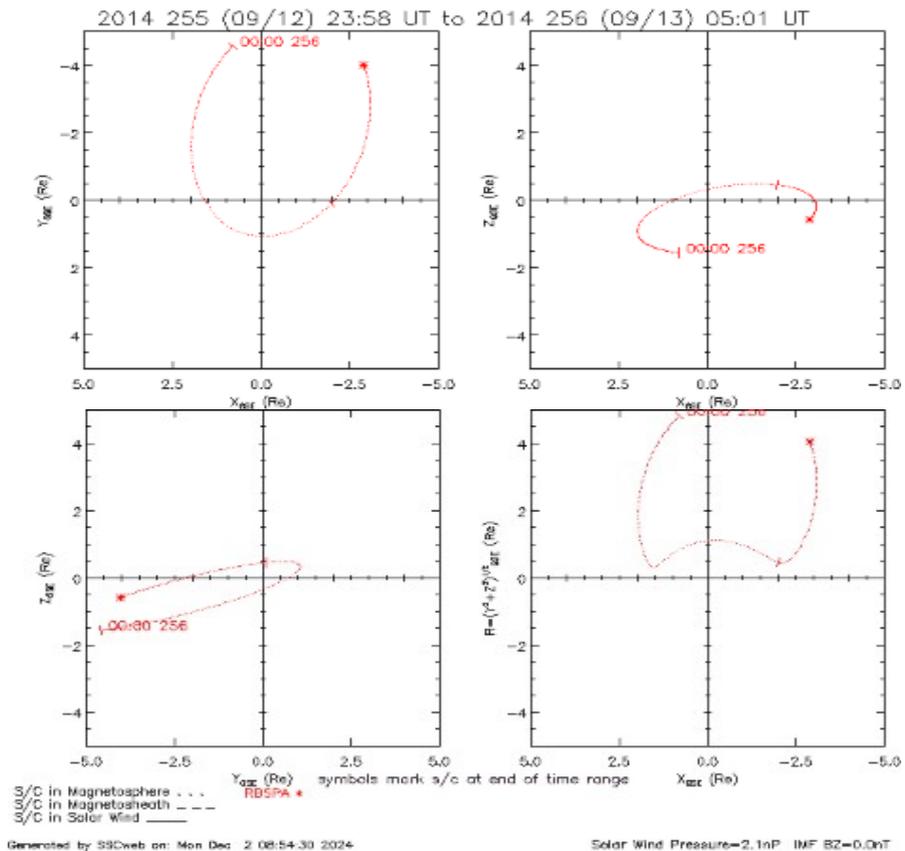


Figura 7 - Gráfico da órbita da Sonda Van Allen através da plataforma SSCWeb.



Após a verificação das órbitas, utiliza-se a plataforma Autoplot, disponibilizada pela missão Van Allen para obter o fluxo de elétrons de alta energia e potência espectral do campo magnético ao longo a órbita das sondas Van Allen. Assim, pode-se analisar o fluxo de elétrons e as ondas, hiss e magnetossônicas na magnetosfera interna, que inclui os dois cinturões, a região do slote (vazio) e a

plasmasfera.

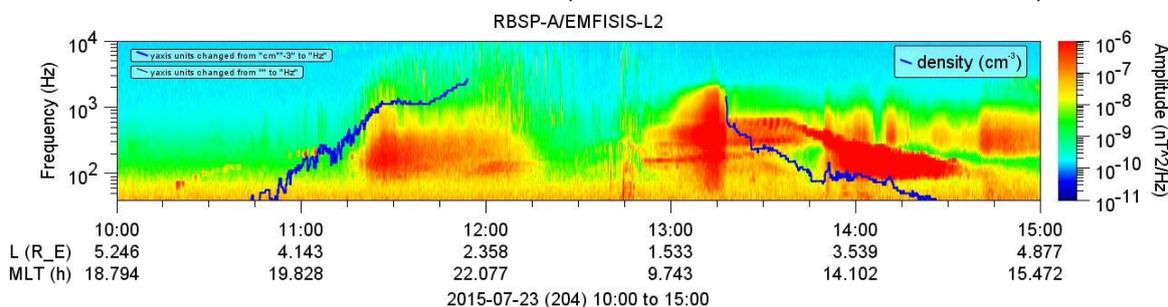
Considerando os eventos com diminuição de fluxo de elétrons e atividade de ondas hiss e/ou magnetossônicas no cinturão interno de radiação e passagem das sondas Van Allen sobre a SAMA, são selecionados três eventos que cumpriram tais requisitos. Assim, são realizados os plotes da coluna total de ozônio na região central da SAMA (25°S e 47.5°W) para estes eventos, conforme segue suas descrições abaixo.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Ondas Hiss e Magnetossônicas (MS)

Na Figura 8, é apresentada a densidade espectral de potência do campo magnético, a qual mostra atividade de ondas hiss e magnetossônicas na região abaixo da plasmapausa (linha azul) para o primeiro evento (23 de julho de 2015), que coincide com o cinturão interno e plasmasfera. Observa-se que os maiores valores de amplitude se encontram aproximadamente 13:15UTC, alcançado valores em torno de  $10^{-6}$  nT<sup>2</sup>/Hz. Também é apresentada a relação entre a frequência do plasma e a frequência ciclotrônica do elétron ( $w_{pe}/w_{ce}$ ), o qual se mostra em crescente aumento a partir das 10:45UTC. Vale ressaltar que valores próximos de 5 sugere maior eficiência de interação ressonante entre os elétrons e estas ondas (Da Silva et al., 2022; Lei et al., 2017).

Figura 8 - Densidade espectral de potências de ondas hiss e magnetossônica na região da plasmapausa. Os espectrogramas de campo magnético são obtidos pelo instrumento EMFISIS a bordo das sondas Van Allen A (Evento 1 - 23 de setembro de 2015).

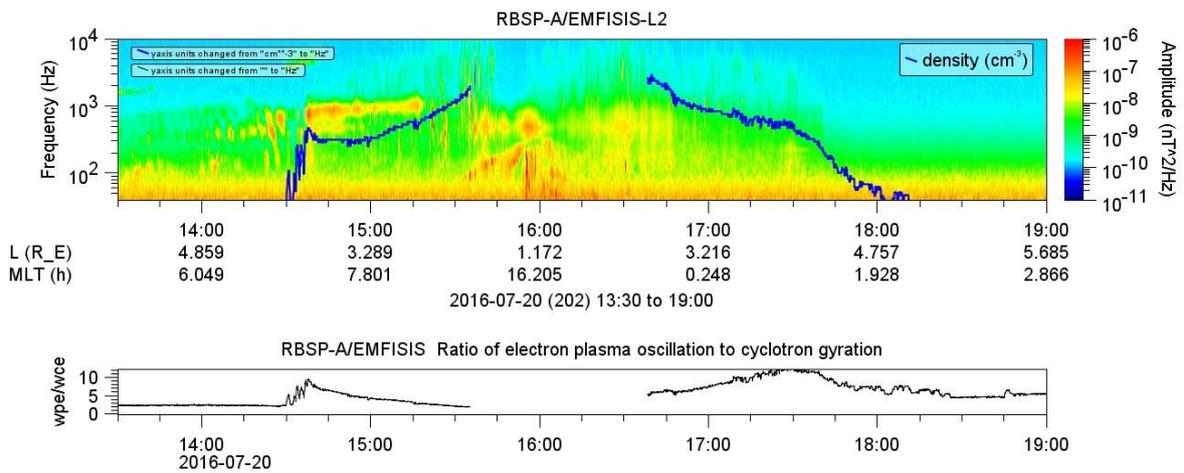


Fonte: Autor (2025).

O segundo evento (20 de julho de 2016), é apresentado na Figura 9, em que os maiores valores de amplitude da densidade espectral de potências ocorrem aproximadamente as 15:30UTC, alcançado valores em torno de  $10^{-7}$  nT<sup>2</sup>/Hz.

Cabe ressaltar também, a relação entre a frequência do plasma e a frequência ciclotrônica do elétron ( $w_{pe}/w_{ce}$ ), o qual apresenta valores próximos de 5, indicando uma maior interação entre essas partículas e as ondas (Lei et al., 2017).

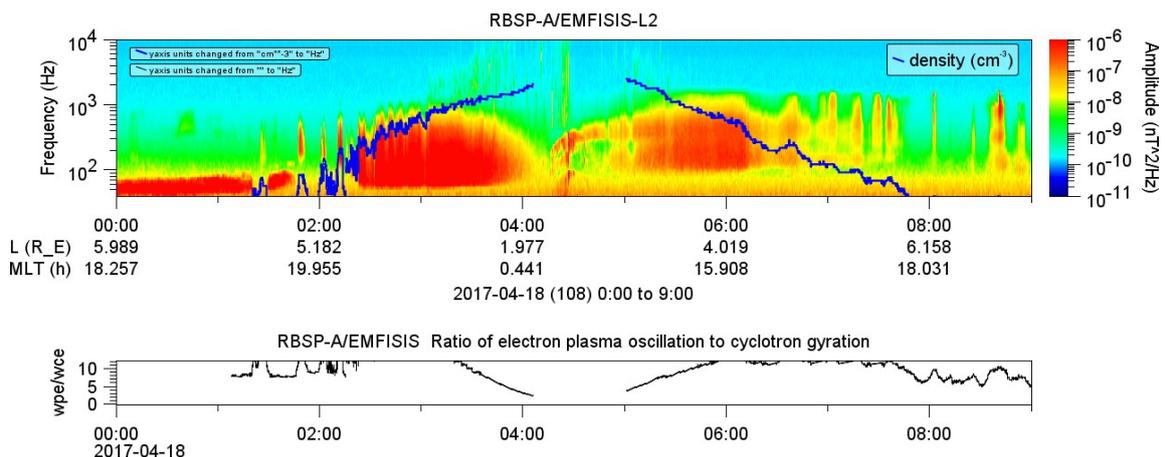
Figura 9 - Densidade espectral de potências de ondas hiss e magnetosônica na região da plasmapausa. Os espectrogramas de campo magnético são obtidos pelo instrumento EMFISIS a bordo das sondas Van Allen A (Evento 2 - 20 de julho de 2016).



Fonte: Autor (2025).

Por fim, na Figura 10, pode-se observar o terceiro evento (18 de abril de 2017), em que os maiores valores de amplitude da densidade espectral de potências observados entre 02:30 e 04:00UTC, alcançam valores em torno de  $10^{-6}$   $nT^2/Hz$ . A relação entre a frequência do plasma e a frequência ciclotrônica do elétron ( $w_{pe}/w_{ce}$ ) apresenta-se mais frequentemente com valores acima de 5, indicando uma maior interação entre essas partículas e as ondas na plasmasfera.

Figura 10 - Densidade espectral de potências de ondas hiss e magnetosônica na região da plasmapausa. Os espectrogramas de campo magnético são obtidos pelo instrumento EMFISIS a bordo das sondas Van Allen A (Evento 3 - 18 de abril de 2017).



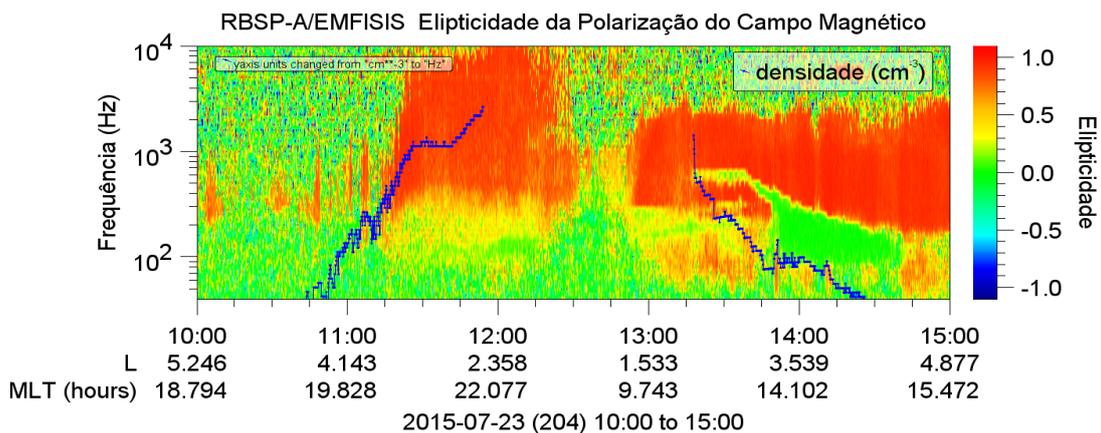
Fonte: Autor (2025).

## 4.2 Elipicidade e Planaridade

A potência espectral apresentada na seção anterior apenas sugere a presença das ondas hiss e magnetossônicas. Contudo para identificar os dois diferentes tipos de ondas de interesse faz-se necessário aplicar uma técnica baseada na análise da polarização do campo magnético, por meio dos parâmetros de elipticidade e planaridade.

Na Figura 11, é apresentado o espectro de elipticidade da polarização do campo magnético, obtido pelo instrumento EMFISIS a bordo da sonda RBSP-A, no dia 20 de julho de 2015. Observa-se que, ao longo do intervalo analisado (10:00 a 15:00 UTC), a elipticidade apresenta variações significativas, destacando-se duas regiões distintas. A primeira, representada por uma faixa mais intensa em tons avermelhados, está associada a valores de elipticidade próximos de +1, o que indica a presença de ondas do tipo hiss (Da Silva et al., 2022). A segunda, em tons amarelados e esverdeados, apresenta elipticidade em torno de +0,2, característica típica de ondas magnetossônicas (Da Silva et al., 2022).

Figura 11 - Espectrograma de Elipticidade da polarização do campo magnético obtido pelo instrumento EMFISIS a bordo da sonda Van Allen A (Evento 1 no dia 20 de julho de 2015).

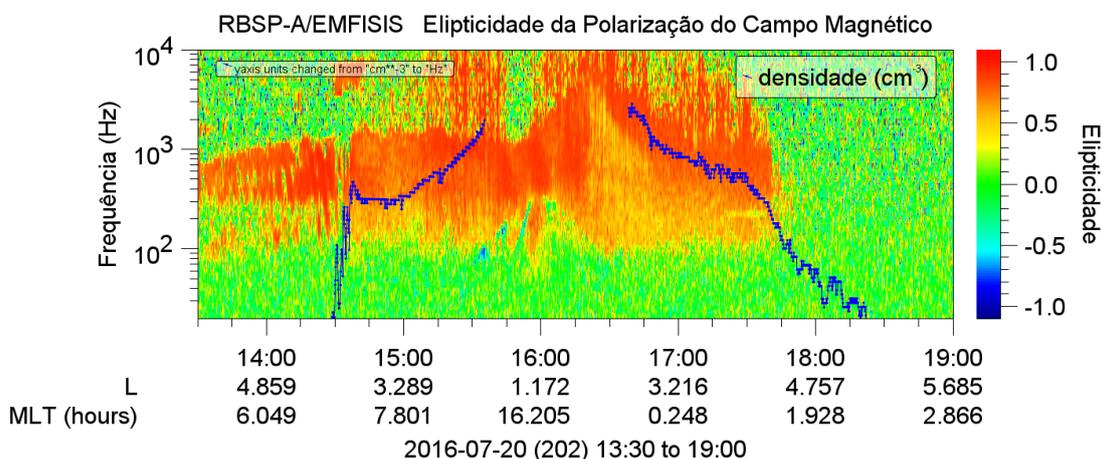


Fonte: Autor (2025).

O segundo evento, referente ao dia 20 de julho de 2016, é apresentado na Figura 12. Nota-se a predominância de elipticidade positiva ao longo do intervalo entre 14:00 e 17:30 UTC, com valores em torno de +0,2, indicados por regiões com tonalidade amarelada. Esses valores são característicos de ondas do tipo magnetossônicas, sugerindo sua possível presença nesse período. Contudo, a ausência de uma faixa bem definida compromete a confirmação inequívoca desse modo de onda. Adicionalmente, identificam-se áreas com elipticidade mais

elevada, próximas de +1, o que indica, de forma complementar, a ocorrência de ondas do tipo hiss.

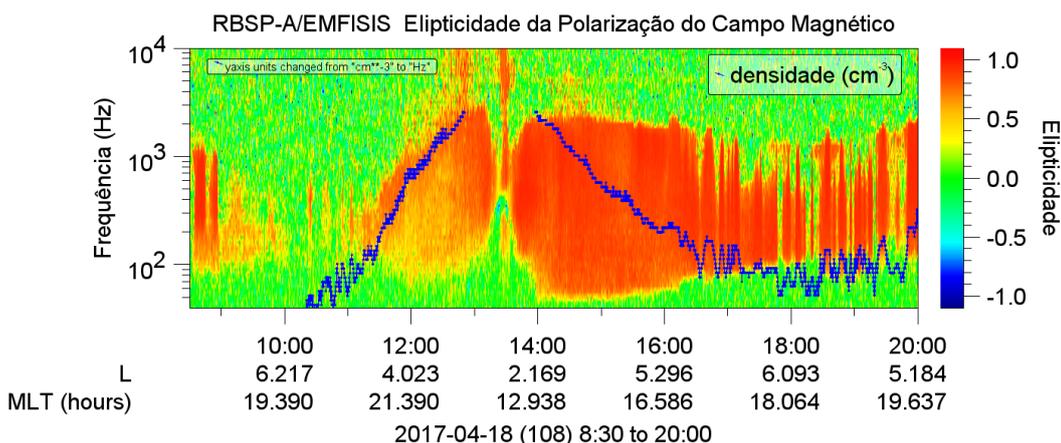
Figura 12 - Espectrograma de elipticidade da polarização do campo magnético obtido pelo instrumento EMFISIS a bordo da sonda Van Allen A (Evento 2 no dia 20 de julho de 2016).



Fonte: Autor (2025).

No terceiro evento, representado na Figura 13 e correspondente ao dia 18 de abril de 2017, evidencia-se uma ampla faixa de elipticidade positiva ao longo de grande parte do intervalo temporal analisado (09:00 - 20:00 UTC). Essa condição, evidenciada por regiões em tonalidade amarelada, é indicativa da presença persistente de ondas magnetossônicas ao longo da maior parte da trajetória orbital. Ademais, observa-se, principalmente entre 11:00 e 13:30 UTC, a ocorrência de áreas com elipticidade mais elevada, próximas de +1, as quais são compatíveis com ondas do tipo hiss. A simultaneidade desses padrões sugere a possível coexistência entre os dois modos de propagação no decorrer do evento.

Figura 13 - Espectrograma de elipticidade da polarização do campo magnético obtido pelo instrumento EMFISIS a bordo da sonda Van Allen A (evento 3 no dia 18 de abril de 2017).

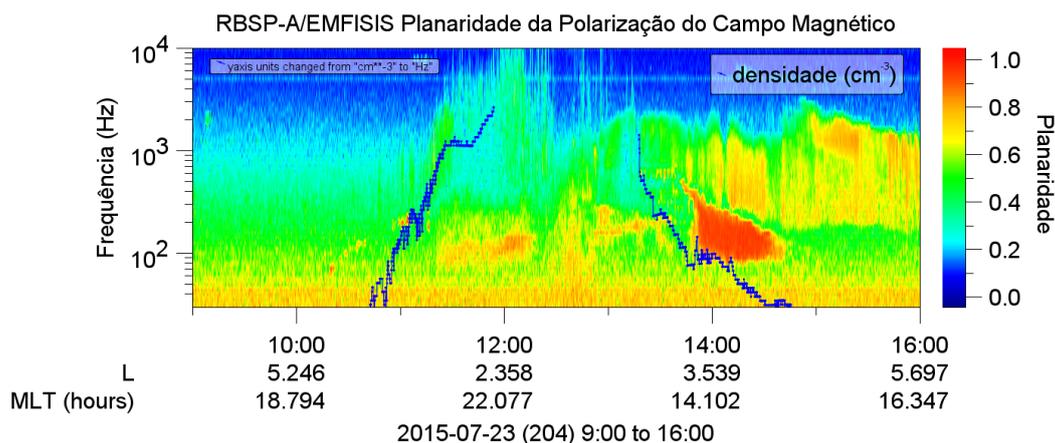


Fonte: Autor (2025).

A primeira análise de planaridade é apresentada na Figura 14, a qual corresponde ao evento 1 ocorrido no dia 23 de julho de 2015. Observa-se que, ao longo do intervalo analisado, os valores de planaridade se mantêm predominantemente abaixo de 0,6, com exceção de uma região bem definida entre aproximadamente 13:30 e 15:00 UTC, onde os valores ultrapassam 0,8. Essa faixa, evidenciada em tons alaranjados e vermelhos, indica uma propagação coerente da onda, característica compatível com ondas magnetossônicas.

Segundo Horne et al. (2007) e Ma et al. (2016), valores de planaridade acima de 0,8 indicam propagação altamente oblíqua em relação ao campo magnético e polarização predominantemente linear, o que reforça a identificação desse modo de onda. Por outro lado, regiões com planaridade mais baixa, especialmente abaixo da linha azul de densidade de elétrons (indicando a região da plasmasfera), podem estar associadas à presença de ondas hiss. A presença simultânea desses padrões sugere a ocorrência de diferentes modos de onda no mesmo evento, com destaque para uma possível onda magnetossônica fora da plasmasfera, próximo das 14:00 UTC.

Figura 14 - Espectrograma de planaridade da polarização do campo magnético obtido pelo instrumento EMFISIS a bordo do a bordo das sondas Van Allen A (Evento 1 no dia 23 de julho de 2015).



Fonte: Autor (2025).

A segunda análise de planaridade é apresentado na Figura 15, referente ao segundo evento, ocorrido no dia 20 de julho de 2016. Durante o intervalo analisado, observa-se uma predominância de valores de planaridade abaixo de 0,6, especialmente dentro da região delimitada pela linha azul de densidade de elétrons, o que é compatível com a presença de ondas do tipo hiss. Contudo,

destaca-se uma região central, por volta das 15:40 UTC, em que os valores de planaridade atingem aproximadamente 0,8, evidenciada por uma coloração mais intensa em tons alaranjados. Essa característica sugere a ocorrência pontual de uma onda magnetossônica fora da plasmasfera. A distribuição dos valores de planaridade ao longo do evento indica, portanto, a coexistência dos dois modos de onda, com predominância de ondas hiss e possível ocorrência de uma magnetossônica bem definida na região central da passagem orbital.

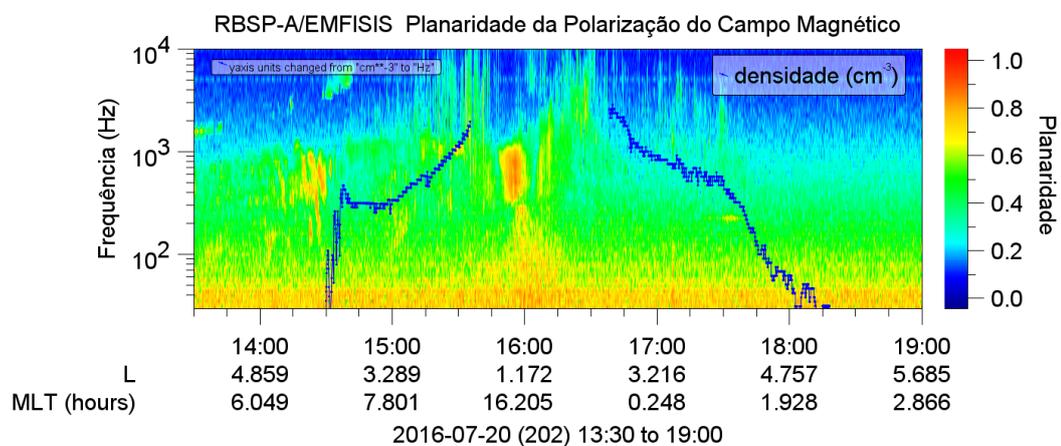
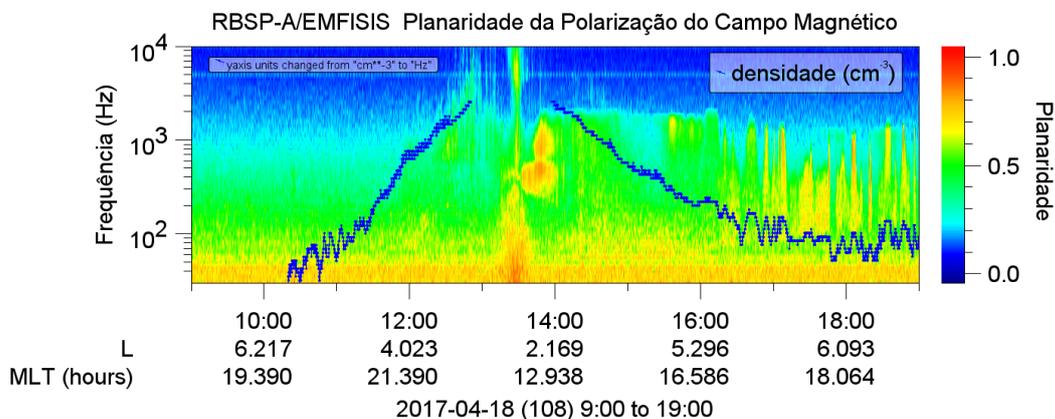


Figura 15 - Espectrograma de planaridade da polarização do campo magnético obtido pelo instrumento EMFISIS a bordo do a bordo das sondas Van Allen A (Evento 2 no dia 20 de julho de 2016).

Fonte: Autor (2025).

Para o terceiro evento, a análise de planaridade é apresentado na Figura 16, correspondente ao dia 18 de abril de 2017. Ao longo do intervalo analisado, observa-se a ocorrência de planaridades predominantemente superiores a 0,6, com destaque para regiões que atingem valores próximos de 0,8, principalmente entre 13:30 e 14:30 UTC. Esses valores mais elevados, evidenciados por tons alaranjados, sugerem a presença de ondas do tipo magnetossônica, localizadas fora da plasmasfera. Já nas demais regiões, principalmente aquelas contidas dentro da linha azul de densidade que define o limite da plasmasfera, a planaridade se mantém abaixo de 0,6, o que é indicativo da presença de ondas hiss.

Figura 16 - Espectrograma de planaridade da polarização do campo magnético obtido pelo instrumento EMFISIS a bordo do a bordo das sondas Van Allen A (Evento 3 no dia 18 de abril de 2017).

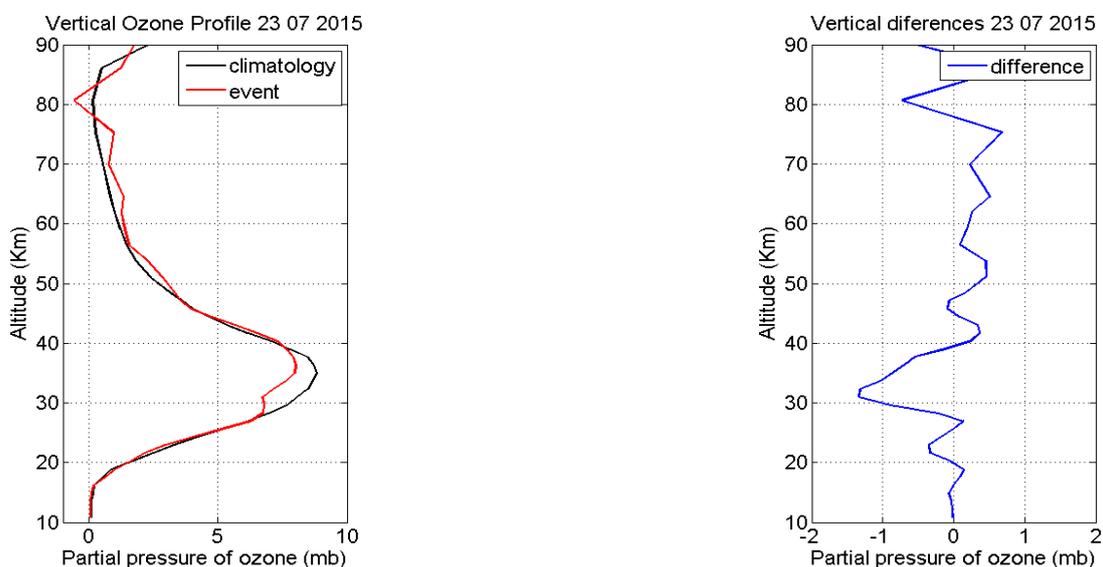


Fonte: Autor (2025).

### 4.3 Ozônio

Na Figura 17, observa-se o perfil da coluna total de ozônio comparando a climatologia (linha preta) com o primeiro evento analisado (linha vermelha). Pode-se perceber que houve uma diminuição significativa do ozônio tanto na camada entre 30~40Km, a qual corresponde a estratosfera, quanto na faixa de ~80Km, a qual se refere a mesosfera, esta diminuição pode ter relação direta com a precipitação de elétrons na região da SAMA.

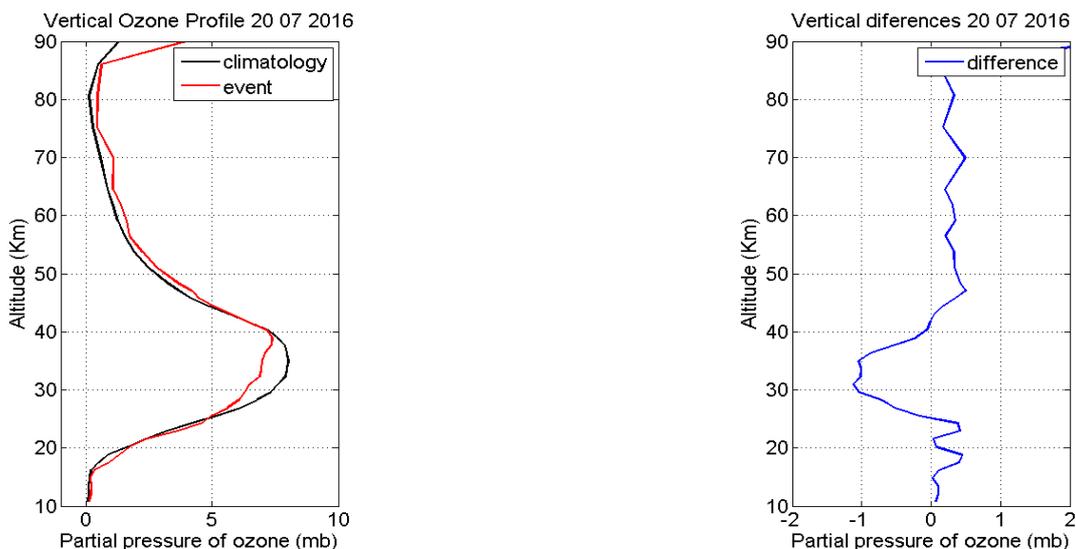
Figura 17 - a) Perfil da coluna total de ozônio comparando a climatologia (linha preta) com o evento analisado (linha vermelha) e (b) Diferença entre o evento e a climatologia (Evento 1 - 23 de julho de 2015).



Fonte: Autor (2025).

Para o segundo evento, mostrado na Figura 18, que ocorreu no mês de julho de 2016, especificamente no dia 20, é possível notar que também houve uma redução significativa do ozônio na estratosfera (30~40Km), porém, cabe ressaltar que na mesosfera (~80Km) não houve diminuição.

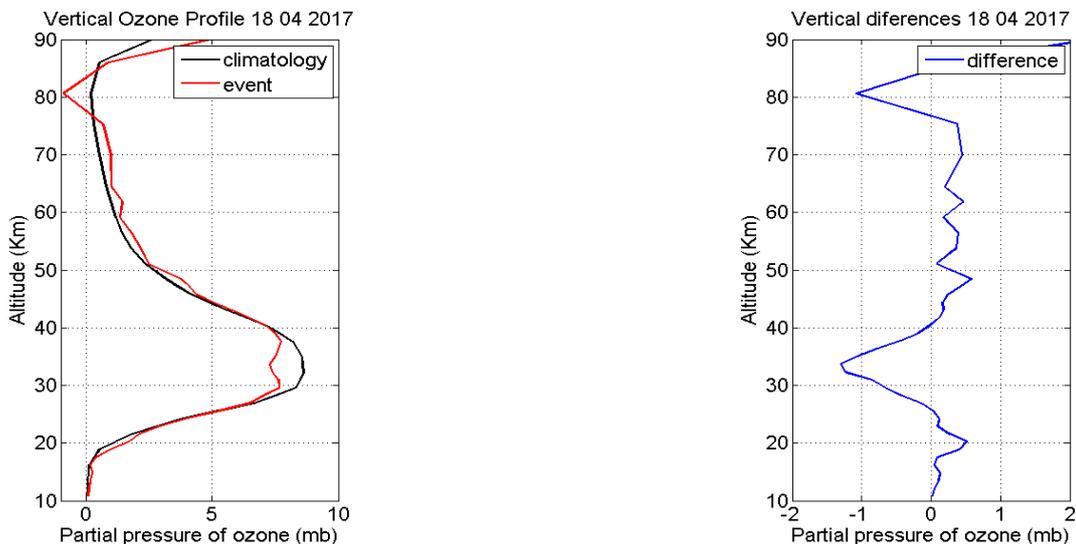
Figura 18 - a) Perfil da coluna total de ozônio comparando a climatologia (linha preta) com o evento analisado (linha vermelha) e (b) Diferença entre o evento e a climatologia (Evento 2 - 20 de julho de 2016).



Fonte: Autor (2025).

Por fim, na Figura 19, a qual se refere o perfil da coluna total de ozônio para o terceiro evento analisado, uma diminuição significativa do ozônio pode ser observado na estratosfera (30~40Km), tendo um leve aumento nas camadas superiores até a mesosfera (~80Km) onde há uma outra significativa diminuição do ozônio.

Figura 19 - a) Perfil da coluna total de ozônio comparando a climatologia (linha preta) com o evento analisado (linha vermelha) e (b) Diferença entre o evento e a climatologia (Evento 3 - 18 de abril de 2017).



Fonte: Autor (2025).

## 5 CONCLUSÃO

Utilizando a potência espectral do campo magnético durante o perigeu das sondas Van Allen, foi possível detectar ondas hiss plasmasféricas e ondas magnetossônicas no cinturão interno. Estas podem interagir ressonantemente com elétrons, lançando-os no cone de perda para precipitarem na atmosfera, sobre a região da SAMA. Utilizando a técnica de polarização de ondas, foi possível identificar e distinguir esses dois tipos de onda. Uma confirmação de ocorrência desse mecanismo está na razão  $wpe/wce$ , que apresentou valores próximos de 5 para os três eventos analisados, indicando condições de plasma propícias para causar a precipitação de elétrons na atmosfera.

Portanto, a dinâmica do cinturão interno de radiação colabora para a ocorrência de precipitação de elétrons na atmosfera sobre o centro da SAMA. Por outro lado, a distribuição do ozônio sobre essa região apresentou diminuição significativa no mesmo dia de ocorrência de precipitação de elétrons, para todos os eventos estudados. Especificamente, observou-se redução na coluna total de ozônio sobre Santa Maria em comparação com a climatologia, o que reforça a hipótese de que a interação ressonante entre ondas magnetossônicas e elétrons pode influenciar a distribuição do ozônio estratosférico em regiões de baixa latitude como a SAMA.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adams, E. Y., Fretz, K. A., Ukhorski, A. Y., & Fox, N. J. (2016). Probes Mission Overview and Discoveries to Date. Johns Hopkins APL Technical Digest, Volume 33, Number 3 (2016). <https://secwww.jhuapl.edu/techdigest/>.

Bortnik, J., Thorne, R. & Meredith, N. The unexpected origin of plasmaspheric hiss from discrete chorus emissions. *Nature* 452, 62–66 (2008). <https://doi.org/10.1038/nature06741>.

Da Silva, L. A.; Shi, J ; Resende, L. C. A. ; Agapitov, O. V. ; Alves, L. R. ; Batista, I. S.; Arras, C. ; Vieira, L. E. ; Deggeroni, V. ; Marchezi, J. P. ; Wang, C. ; Moro, J. ; Inostroza, A. ; Li, H. ; Medeiros, C. ; Cardoso, F. R. ; Jauer, P. ; Alves, M. V. ; Chen, S.S. ; Liu, Z. ; Denardini, C. M. ; Gonzalez, W. (2022). The Role of The Inner Radiation Belt Dynamic In The Generation of Auroral-Type Sporadic E-Layers over South American Magnetic Anomaly. *Frontiers in Astronomy and*

*Space Sciences*, V. 9, P. 1-23. <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.970308>.

Horne, R. B., Thorne, R. M., Glauert, S. A., Meredith, N. P., Pokhotelov, D., and Santolík, O. (2007). Electron acceleration in the Van Allen radiation belts by fast magnetosonic waves. *Geophys. Res. Lett.* 34, L17107. <https://doi.org/10.1029/2007GL030267>.

Kletzing, C. A., Kurth, W. S., Acuna, M., MacDowall, R. J., Torbert, R. B., Averkamp, T., et al. (2013). The Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS) on RBSP. *Space Science Reviews*, 179 (1–4), 127–181. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-9993-6>.

Lei, M., Xie, L., Li, J., Pu, Z., Fu, S., Ni, B., et al. (2017). The radiation belt electron scattering by magnetosonic wave: Dependence on Key parameters. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 122 (12), 12338–12352. doi:10.1002/2016JA023801.

Mauk, B. H., Fox, N. J., Kanekal, S. G., Kessel, R. L., Sibeck, D. G., & Ukhorskiy, A. (2012). Science objectives and rationale for the radiation belt storm probes mission. *Space Science Reviews*, 179, 3–27. <https://doi.org/10.1007/s11214-012-9908-y>.

Ma, Q., Li, W., Thorne, R. M., Bortnik, J., Kletzing, C. A., Kurth, W. S., et al. (2016). Electron scattering by magnetosonic waves in the inner magnetosphere. *JGR. Space Phys.* 121 (1), 274–285. <https://doi.org/10.1002/2015JA021992>.

Nigel P. Meredith, Richard B. Horne, Mark A. Clilverd, David Horsfall, Richard M. Thorne, Roger R. Anderson. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* Volume 111 (2006). <https://doi.org/10.1029/2006JA011707>.

Sauby, M. L. *Fundamentals of atmospheric physics*. International geophysics series, Volume 61, Academic Press, 1996.

Van Allen, J. A., Ludwig, G. H., Ray, E. C., & McIlwain, C. E. (1958). Observation of high intensity radiation by satellites 1958 Alpha and Gamma. *Journal of Jet Propulsion*.